



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Análisis de estado del arte de desarrollos industriales y caracterización de **baterías de sodio**



INVESTIGADORES



Marcos Lafoz Pastor

Jorge Nájera Álvarez

Julio Amador Guerra

Alberto Abánades Velasco

06 de Mayo de 2026

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| 1. Introducción. La conveniencia y necesidad de utilizar el sodio como alternativa para material en baterías | 03 |
| 1.1. Aspectos constructivos en productos actuales y características tecnológicas | 04 |
| 1.2. Comparativa con el litio a nivel técnico, socioeconómico y ambiental | 05 |
| 1.3. Desarrollo industrial y fabricantes | 06 |
| Conclusiones del análisis de fabricantes de baterías de sodio-ion | 16 |
| 2. Definición de modelos y su utilidad dentro de su aplicación industrial | 17 |
| 2.1. Arquitecturas de modelos representativos y justificación de su uso en aplicaciones industriales | 17 |
| 2.2. Revisión de modelos semiempíricos en la literatura: dinámicos, térmicos y de envejecimiento | 18 |
| 3. Metodología de caracterización dinámica, térmica y de envejecimiento de baterías de sodio-ion | 20 |
| 3.1. Adaptación de metodologías de caracterización aplicadas a baterías de ion-litio | 20 |
| 3.2. Equipamiento de laboratorio y protocolos de ensayo requeridos | 21 |
| 4. Conclusiones y retos tecnológicos y comerciales de las baterías de ion sodio para sustituir a las baterías de ion litio | 23 |
| Referencias | 24 |

Listado de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Características de funcionamiento de las baterías de ion sodio en comparación con las de ion litio | 05 |
| Tabla 2. Características económicas y de suministro de materiales | 05 |
| Tabla 3. Características desde el punto de vista de Impacto Medioambiental | 05 |
| Tabla 4. Características desde el punto de vista de la Seguridad | 05 |
| Tabla 5. Resumen de los fabricantes de baterías Na-ion | 15 |
| Tabla 6. Comparativa de las diferentes arquitecturas de modelos | 18 |

Listado de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Elementos de una batería de ion sodio [Fuente: El Aggadi] | 04 |
| Figura 2. Mapa que representa geográficamente dónde están localizados los fabricantes más relevantes de baterías de sodio-ion | 06 |
| Figura 3. Diagrama del circuito equivalente utilizado en Yi-Feng et al. (2021) | 18 |
| Figura 4. Diagrama del circuito equivalente utilizado en Rabab et al. (2023) | 19 |
| Figura 5. Diagrama del circuito equivalente utilizado en Jiang et al. (2025) | 19 |
| Figura 6. Cámara climática del laboratorio de la unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT | 20 |
| Figura 7. Rack de fuentes bidireccionales del laboratorio de la unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT | 20 |
| Figura 8. Laboratorio de la unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT. con el equipamiento necesario para la realización de ensayos de caracterización | 20 |

1. Introducción. La conveniencia y necesidad de utilizar el sodio como alternativa para material en baterías

El almacenamiento de energía está identificado como una de las alternativas al aumento de la integración de generación de electricidad basada en fuentes renovables. De las diferentes tecnologías susceptibles de ser utilizadas para los distintos servicios de regulación operativa, tanto en tensión, como frecuencia, o capacidad a corto/medio plazo que se pueden ofrecer a la operación de las redes eléctricas, la tecnología de baterías destaca por su flexibilidad y por la competitividad que económicamente se ha alcanzado en la tecnología, principalmente potenciado por el despliegue masivo a nivel mundial del vehículo eléctrico.

De entre las baterías utilizadas hoy en día destaca principalmente la familia de las baterías basadas en iones de litio. El litio es el primer metal de la tabla periódica y por tanto el más ligero y electronegativo, lo cual le confiere unas características de densidad de energía y capacidad para proporcionar altas potencias que son muy importantes. Sin embargo, la disponibilidad del material de litio en la naturaleza, y en concreto en forma de depósitos de sales de litio que son los menos costosos de explotar, se limita a unas reservas identificadas de cerca de 90 millones de toneladas métricas y, con un consumo creciente que alcanzó 240.000 toneladas métricas en 2024, las proyecciones fijan en unos 50 años la duración del litio, pero es evidente que la escasez de material afectará al mercado mucho antes. Otra dificultad añadida es la concentración en unos pocos países de las reservas de litio. Por ejemplo, Bolivia, Chile y Argentina disponen de más del 50 % de las reservas de todo el planeta.

La producción de litio presenta una concentración aún mayor, de forma que cuatro países Australia, Chile, China y Argentina producen más del 90 %. Si nos acercamos al final de la cadena, el monopolio se acentúa aún más ya que solo China fabrica del orden del 75 % de las baterías de litio a nivel mundial.

Por otra parte, la extracción del litio requiere, en gran parte de los yacimientos, minería a cielo abierto con importantes movimientos de tierra y un elevado consumo de agua. Aunque existe una importante cantidad de litio en forma de mineral en roca, es mucho más costoso de extraer y compromete de manera importante los costes objetivos necesarios para asegurar la viabilidad del uso de baterías de ion-litio.

Los problemas ambientales del litio no se limitan a su extracción, los procesos de fabricación requieren el uso de sustancias químicas peligrosas, una gran cantidad de minerales y un elevado consumo de energía. Por otra parte, su reciclado es complejo y presenta materiales con importante toxicidad para el medio ambiente.

La aplicación a gran escala de las baterías basadas en iones de litio y en aplicaciones relacionadas con actividades fuera de entornos industriales, en donde no hay tanto control en su uso, está poniendo de manifiesto algunos aspectos relevantes.

Uno de los principales es el de la seguridad de las baterías, por ejemplo, durante su carga, que ha de ser con un dispositivo gestionado apropiadamente, y el riesgo de embalamiento térmico o “thermal runaway”, que se produce como consecuencia de la aceleración de las reacciones electroquímicas por efecto del calor generado tras un fallo en la batería. Este desbordamiento térmico es uno de los principales problemas que se han detectado en las baterías de ion-litio. Como consecuencia de esa excursión térmica se producen gases tóxicos que suponen un peligro adicional para el personal de extinción de incendios o las inmediaciones cuando se produce un incidente, sobre todo en entornos poco ventilados. Para ello, bien se mejoran mediante el uso de recubrimiento especiales, se innova en el uso de materiales para su fabricación o se añaden mecanismos mitigadores en las propias baterías.

Por todas las razones indicadas, es necesario explorar otras alternativas de baterías desde el punto de vista de materiales. Consultando la tabla periódica, el siguiente candidato es el sodio. El sodio es 500 veces más abundante en la naturaleza que el litio, de hecho, es el sexto elemento más abundante en la corteza terrestre.

Además, está distribuido geográficamente de manera muy uniforme y su extracción es más sencilla, sostenible y económica. La fabricación de baterías de sodio requiere elementos más abundantes y, en general, menos tóxicos y más económicos.

| | | GRUPO | |
|---------|---|-----------------------------------|------------------------------------|
| | | 1 | 2 |
| | | IA | IIA |
| PERIODO | 1 | 1 1.0079 H HIDRÓGENO | |
| | 2 | 3 6.941 Li LITIO | 4 9.0122 Be BERILIO |
| | 3 | 11 22.990 Na SODIO | 12 24.305 Mg MAGNESIO |
| | 4 | 19 39.098 K POTASIO | 20 40.078 Ca CALCIO |

En los años 90's hubo desarrollos de baterías basadas en sodio y combinadas con azufre (ref. baterías NaS). Tuvieron una cierta repercusión en proyectos reales en Japón, utilizadas para aplicaciones de red pero la necesidad de mantener el sistema a una temperatura en el entorno de 300°C hizo poco viable técnica y económicamente esta solución.

Actualmente, se están investigando y desarrollando baterías basadas en ion sodio, con una estructura y características similares a las de ion litio. Los prometedores resultados que se han alcanzado hasta ahora tanto a nivel investigación como en la etapa industrial precomercial hacen pensar en que puede ser una de las alternativas al litio para un futuro cercano; dando solución a los problemas de abastecimiento a largo plazo, seguridad y toxicidad asociadas al uso del litio, especialmente en entornos no industriales y controlados. Además, como se ha indicado, el sodio, al ser un elemento mucho más abundante en la naturaleza, presenta menores problemas de suministro, de dependencia y de costes.

Por ello, el interés de este informe, que permite mostrar el estado del arte y el potencial de esas baterías basadas en ión sodio, con el fin de evaluar su potencial futuro y los desarrollos que se pueden esperar en el futuro. Para una empresa como Master Battery, le puede proporcionar herramientas para tomar decisiones estratégicas de cara al desarrollo comercial y de tecnología propia en el campo de las baterías basadas en ion sodio.

1.1. Aspectos constructivos en productos actuales y características tecnológicas

Las baterías de ion sodio (Na-ion) tienen una estructura semejante a las de ion litio.

- El **ánodo** está compuesto por una estructura de carbono diferente al grafito, material habitual en las baterías de ion litio. La razón es que los iones de sodio, más grandes que los de litio, no se intercalan de manera eficiente en la estructura del grafito. Se suele denominar carbón duro (*hard carbon*) y en algunas ocasiones se puede obtener a partir de biomasa.
- El **cátodo** puede estar formado por distintos óxidos de sodio, entre los que se encuentran: Prussian White/Azul de Prusia (hexacianoferratos); óxidos en capas (Na-Me-O₂) y polianiónicos (Na-Fe-SO₄, NaFePO₄, Na₃V₂(PO₄)₃, NaNiMnCo). Estos últimos son responsables de proporcionar un elevado número de ciclos. Estos óxidos actúan como almacén de iones sodio en el cátodo. Durante la carga de la batería, los Na⁺ se liberan hacia el electrolito y durante la descarga, recupera esos Na⁺ desde el ánodo.
- El **electrolito** está formado por sales de sodio disueltas en solventes orgánicos, de manera equivalente al caso de las baterías de litio, donde se usan sales de litio (por ejemplo, LiPF₆).
- El **separador**, similar al de las baterías de litio, compuesto por poliolefina.
- **Colectores de corriente**, también similares a las baterías de litio-ion, siendo de cobre el del ánodo y de aluminio el del cátodo.

La Figura 1 presenta un esquema de estos elementos.

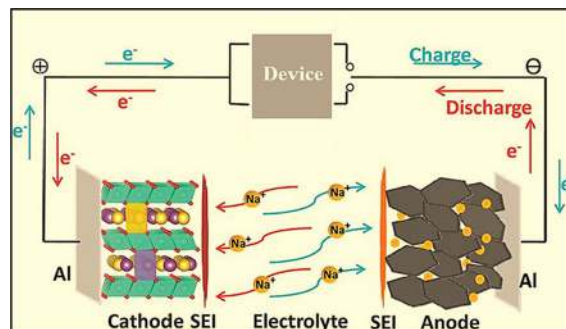


Figura 1. Elementos de una batería de ion sodio (Fuente: El Aggadi).

Algunas de las características más relevantes de las baterías de sodio-ion son:

- **Densidad energética:** La mayoría de las soluciones actuales se sitúan entre **140 y 165 Wh/kg**, con algunos casos alcanzando hasta **175 Wh/kg** (CATL) acercándose a los valores de las baterías LFP (fosfatos de hierro y litio) de litio.
- **Ciclo de vida:** Está entre **3.000 y 6.000 ciclos** antes de alcanzar el 80 % de su capacidad. Es similar a los alcanzados en baterías LFP de litio.
- **Temperatura:** El sodio-ion destaca por **excelente rendimiento en climas fríos**, manteniendo más del 80-90 % de capacidad a -20°C, incluso hasta -40°C en casos de fabricantes como CATL, Transimage y Zenergy. En esas condiciones las baterías de litio LFP pierden eficiencia de manera importante.
- **Carga rápida:** Muchos fabricantes ya trabajan con **ratios de carga de 3C a 5C**, e incluso superiores en aplicaciones específicas (hasta 20C en el caso de NEG).
- Una ventaja que ofrecen algunos fabricantes de baterías de sodio ion es que, en términos de seguridad, sus celdas cilíndricas pueden **descargarse totalmente a 0 V** y almacenarse y transportarse sin riesgo de degradación en las mismas.
- Al no depender de materiales críticos como litio, níquel ni cobalto, las baterías de sodio-ion podrían evitar cuellos de botella de materias primas y aranceles (ventaja en mercados como EE.UU/Europa donde las Li-ion importadas tienen gravámenes).

En resumen, las principales ventajas que ofrecen las baterías de sodio y que suponen una alternativa interesante al litio son:

- Mayor sostenibilidad al no depender de materiales críticos.
- Una gran adaptabilidad para distintas aplicaciones (movilidad, industria, red).
- Una mayor seguridad en cuanto a problemas térmicos y transporte.
- Un menor coste de producción, dando lugar a soluciones más asequibles.
- Menor toxicidad de los elementos constructivos.
- Mayor rango de temperatura de operación, sobre todo en climas muy fríos.

Por otro lado, los inconvenientes que presenta son:

- Una baja densidad de energía que limita su utilización a vehículos con baja autonomía o a aplicaciones estacionarias con baja energía.
- Intentar aumentar una reducción de tamaño podría llevar a reducir el número de ciclos de vida de la batería.

1.2. Comparativa con el litio a nivel técnico, socioeconómico y ambiental

De manera más general y de forma comparativa con las baterías de litio-ion, se presentan las características de funcionamiento la Tabla 1.

| Característica | Baterías de Sodio (Na-ion) | Baterías de Litio (Li-ion) |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Densidad energética (gravimétrica) | 90-160 Wh/kg | 180-280 Wh/kg |
| Densidad energética (volumétrica) | 150-200 Wh/L | 400-700 Wh/L |
| Tensión nominal por celda | ~2.5 V - 3.0 V | ~3.6 V - 3.7 V |
| Eficiencia ciclo carga/descarga | 85-92 % | 90-95 % |
| Ciclos de vida | 2000-4000 ciclos | 1000-5000 ciclos |
| Rango operativo de temperatura | -20°C a 60°C | 0°C a 45°C |

Tabla 1. Características de funcionamiento de las baterías de ion sodio en comparación con las de ion litio.

Hay que destacar que la densidad energética es menor que en las baterías de litio-ion, y que únicamente se puede resaltar como ventaja en este ámbito del funcionamiento una mayor tolerancia a las bajas temperaturas frente al litio. Sin embargo, donde sí hay ventajas significativas a favor del sodio es en las características económicas, considerando sobre todo la disponibilidad y de suministro de materiales, tal y como se refleja en la Tabla 2. La utilización de materiales más abundantes en la naturaleza y con un coste de extracción más bajo reduce los costes a la mitad.

| Característica | Baterías de Sodio (Na-ion) | Baterías de Litio (Li-ion) |
|---------------------------|---|---|
| Materia prima | Sodio muy abundante y con bajo coste | Litio, cobalto, níquel más caros y críticos |
| Abundancia geológica | Muy alta (sales comunes) | Limitada (concentrada en pocos países) |
| Coste estimado (€/kWh) | 40-80 €/kWh | 80-150 €/kWh |
| Disponibilidad industrial | Primeras líneas piloto y productos comerciales (CATL, Farasis Energy) | Producción global masiva y madura |

Tabla 2. Características económicas y de suministro de materiales.

Desde el punto de vista del impacto medioambiental, hay que resaltar importantes ventajas de los procesos de extracción y fabricación de las baterías de ion sodio frente a las de litio, tal y como se muestra en la Tabla 3. La no dependencia de minería intensiva y un menor coste energético en el proceso de extracción y procesado supone una menor huella de carbono. Además, la reciclabilidad es más sencilla que cuando se utilizan materiales como el litio o el cobalto, con lo que se da lugar a economías circulares, haciendo que los procesos sean más sostenibles.

| Característica | Baterías de Sodio (Na-ion) | Baterías de Litio (Li-ion) |
|------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Impacto extracción materias primas | Bajo, no depende de minería intensiva | Alto (extracción de litio, cobalto, etc.) |
| Reciclabilidad | Más sencilla (no cobalto, no litio) | Compleja (materiales críticos Litio, cobalto, níquel, y químicos tóxicos) |
| Huella de carbono | Menor durante la fabricación | Alta por minería y procesado del litio |

Tabla 3. Características desde el punto de vista de Impacto Medioambiental.

Por último, y no menos importante, atendiendo a la seguridad de la batería de ion sodio, en comparación con la de ion litio, la Tabla 4 muestra cómo una mayor estabilidad térmica da lugar a un menor riesgo de un “thermal runaway” y, por tanto, a un menor riesgo de incendio [1].

| Característica | Baterías de Sodio (Na-ion) | Baterías de Litio (Li-ion) |
|------------------------|--|--|
| Estabilidad térmica | Mejor: menos riesgo de thermal runaway | Mayor riesgo de thermal runaway |
| Formación de dendritas | Menos propensas a dendritas | Problema serio en algunas químicas |
| Riesgo de incendio | Más bajo, menor reacción exotérmica | Más alto, potencialmente explosivo |
| Estabilidad química | Muy buena, más tolerante a sobrecarga | Menos tolerante a sobrecarga/sobredescarga |
| Seguridad en el manejo | Algunas se descargan a 0 V | Se deben mantener en tensión |

Tabla 4. Características desde el punto de vista de la Seguridad.

1.3. Desarrollo industrial y fabricantes

Hoy en día se observa una tendencia generalizada a invertir en proyectos piloto para mitigar la dependencia del litio, buscando más la coexistencia que la competencia de ambas tecnologías [4] [5]. Actualmente el desarrollo de las baterías de ion sodio a nivel industrial se puede encontrar en una o en varias de las siguientes fases, dependiendo del fabricante:

1ª Fase: investigación, desarrollo e innovación I+D+i.

2ª Fase: proyectos piloto de desarrollo de prototipos.

3ª Fase: desarrollo de plantas de producción.

Aunque la industria más importante de las baterías hoy en día es la de los vehículos eléctricos, la baja densidad de energía que presenta esta tecnología hace que se esté prestando especial atención en la micromovilidad, siendo especialmente interesante para las aplicaciones estacionarias, como las destinadas a la gestión energética relacionada con la generación o con el control de la demanda, donde la densidad de energía queda relegada como factor principal por el coste total de la instalación. Estas aplicaciones estacionarias correspondieron a más del 70 % del mercado de las baterías de sodio en 2024. Sin embargo, algunos informes [2] [3] sugieren que al menos dos modelos de coches eléctricos urbanos en China han salido con baterías de sodio recientemente (uno de JAC y otro de JMEV), lo que parece indicar que la tecnología de sodio-ion también va a tener una cuota importante del mercado de movilidad.

Las proyecciones futuras para esta tecnología son prometedoras [6], esperando que las baterías de sodio-ion alcancen un tercio del mercado mundial para aplicaciones estacionarias: almacenamiento a gran escala, servicios de red, etc entre 2030 y 2035. En el mercado de la micromovilidad de vehículos ligeros: patinetes, motos, bicicletas, etc. también se espera una aportación muy significativa, del orden del 40 % a corto plazo. Para el resto de aplicaciones de movilidad: turismo, autobuses, camiones, etc. los porcentajes son más moderados, en torno al 10 %.

China es el principal país desarrollador de esta tecnología con más del 95 % del mercado mundial. Además de la industria de movilidad eléctrica, en China, la política impulsa soluciones de almacenamiento de larga duración (>4 horas) para estabilizar la red, y las Na-ion encajan por coste. De hecho, en julio de 2023 se inauguró en Hubei el que se denominó “el proyecto de batería de sodio-ion más grande del mundo” (100 MW/200 MWh), indicativo del potencial de su aplicación en el ámbito de redes eléctricas.

A continuación, la Figura 2 muestra un mapa donde se sitúan los principales fabricantes de baterías de sodio ion, seguido de un listado de los mismos, ordenado alfabéticamente. Se incluye para cada uno de ellos: la situación actual de cada empresa, una descripción de las características de los productos, sus aplicaciones objetivo y las principales alianzas y proyectos que están llevando a cabo.



Figura 2. Mapa que representa geográficamente dónde están localizados los fabricantes más relevantes de baterías de sodio-ion.

Altris

Situación actual: Altris (Uppsala, Suecia) se fundó en 2017 como spin-off del Ångström Laboratory de la Universidad de Uppsala. Su objetivo era desarrollar baterías de sodio-ion, más sostenibles, con materiales abundantes, libres de elementos críticos o tóxicos como litio, níquel, cobalto, etc. En 2022 puso en marcha la planta "Ferrum" en Sandviken (Suecia) para producir el material de cátodo "Fennac" con capacidad de 2.000 toneladas/año de material de cátodo, lo que Altris estima que corresponde a ~1 GWh de baterías al año si se equipara al sistema de batería completo [7].

Productos y detalles técnicos: En noviembre de 2023 presentó una celda sodium-ion “de tamaño comercial” con densidad energética validada de > 160 Wh/kg [8]. El cátodo que usan las celdas de sodio-ion de Altris es un material basado en “Prussian White” (análogos de azul de Prusia / blancos de Prusia) que tiene una capacidad de más de 160 mAh/g. También tienen un material de cátodo registrado como Fennac. Este material utiliza sodio, hierro, carbono y nitrógeno. El ánodo es de “hard carbon” y en particular han establecido colaboración con Stora Enso para usar el material “Lignode®”, derivado de lignina (subproducto de la producción de pasta/papel) como hard carbon para el ánodo. En junio de 2024 se anunciaron prototipos producidos a escala piloto de esta tecnología [9].

Aplicaciones objetivo: Altris enfoca su tecnología en mercados donde la batería de sodio-ion tiene ventajas claras: almacenamiento estacionario (respaldo en red e integración de renovables) donde los costes, la seguridad, la sostenibilidad, la vida útil, la disponibilidad de materiales locales son criterios importantes; aplicaciones de baja tensión en movilidad, como vehículos ligeros o sistemas auxiliares dentro del coche; baterías para embarcaciones pequeñas y sistemas flotantes; y aplicaciones residenciales para respaldo de energía (UPS o microrredes).

Alianzas y proyectos: En enero de 2024 recibió apoyo financiero público (SEK 77 millones) de la Swedish Energy Agency para establecer una planta piloto de producción de celdas con sus materiales. En octubre del mismo año, en la ronda Series B1 de inversión consiguió unos SEK 150 millones (~ €13-14 millones) con nuevos inversores como Clarios, Maersk Growth, y Volvo Cars Tech Fund [10].

BYD (FinDreams Battery)

Situación actual: BYD, a través de su división de baterías FinDreams, ha emprendido recientemente proyectos importantes relacionados con baterías de sodio-ion, aunque aún no ha lanzado productos comerciales con esta química en sus vehículos. En 2024 la compañía dio un paso importante al anunciar una empresa conjunta con el Grupo Huaihai (especialista en vehículos eléctricos pequeños) para desarrollar y producir baterías Na-ion a gran escala [11]. Esta joint venture, llamada Huaihai FinDreams Sodium Battery (51 % de FinDreams (BYD) y 49 % de Huaihai), inició la construcción de su primera fábrica en Xuzhou (Jiangsu) a principios de 2024. La planta tendrá una capacidad enorme, de 30 GWh anuales. Esto indica que BYD está acelerando la expansión en sodio-ion para prepararse a su producción masiva en 2025. En síntesis, BYD no tiene aún baterías de sodio en el mercado, pero se está posicionando rápidamente para introducir las.

Productos y detalles técnicos: Se especula que su química estará alineada con la de otros fabricantes chinos, utilizando posiblemente cátodos tipo Prussian White o óxidos en capas optimizados y ánodos de carbono duro. Debido a la menor densidad del sodio-ion, BYD podría implementar una solución híbrida Li+Na en sus vehículos: por ejemplo, combinar celdas Blade LFP con celdas sodio-ion en un mismo pack para lograr equilibrio de coste y alcance, idea que ya exploraba CATL.

Aplicaciones objetivo: BYD está enfocando el sodio-ion hacia vehículos eléctricos más económicos y micromovilidad, así como potencialmente almacenamiento estacionario. La joint venture con Huaihai lo deja claro, ya que Huaihai fabrica mayoritariamente vehículos de baja velocidad y bajo coste: triciclos, carros de golf, motos de tres ruedas, etc. [11]. Es plausible que BYD quiera equipar en el futuro alguno de sus citycars (p. ej. el Seagull o el QQ Ice Cream de su marca asociada) con baterías Na-ion para ofrecer una versión ultra-económica. Más allá de vehículos, BYD podría aplicar sodio-ion en sistemas estacionarios: la demanda mundial de almacenamiento domiciliario y de red con baterías baratas y seguras va en aumento, y FinDreams podría proveer baterías de sodio-ion para estos fines.

Alianzas y proyectos: La principal alianza conocida es la joint venture Huaihai-FinDreams ya mencionada, que asegura tanto un socio especializado en microvehículos como un cliente inmediato para las baterías producidas. Además, BYD podría aprovechar su participación en la iniciativa nacional de estandarización de sodio-ion, siendo miembro de la Asociación de Industria de Baterías de China, que en 2023 publicó la primera guía de baterías de sodio para almacenamiento. Finalmente, cabe mencionar que BYD tiene colaboración con empresas de almacenamiento de energía (como la estatal China Power) y pudiera probar las Na-ion en parques solares o de almacenamiento de red en China una vez disponibles.

CALB (China Aviation Lithium Battery)

Situación actual: CALB, uno de los mayores fabricantes chinos de baterías de litio para vehículos y almacenamiento, ha iniciado esfuerzos de investigación en baterías de sodio-ion, aunque de forma discreta y sin productos anunciados. La empresa obtuvo en 2025 la aprobación de una patente de batería sodio-ion de diseño propio, lo que señala un importante avance técnico. Sin embargo, CALB no ha lanzado prototipos ni dado fechas de producción para baterías de sodio.

Productos y detalles técnicos: Al no haber presentación oficial de productos sodio-ion por CALB, los detalles técnicos son escasos. La patente mencionada sugiere un diseño de celda innovador; si bien su contenido no se divulgó en detalle.

Aplicaciones objetivo: CALB atiende principalmente a vehículos eléctricos (EV) y a almacenamiento estacionario en red con sus baterías de litio. Por lo tanto, es de esperar que su desarrollo en sodio-ion apunte inicialmente a almacenamiento estacionario y aplicaciones de menor densidad, como sustituto de baterías de plomo-ácido o LFP en sistemas estacionarios y movilidad ligera.

Alianzas y proyectos: Hasta la fecha, CALB no ha anunciado proyectos demostrativos ni alianzas específicas en el ámbito sodio-ion.

CATL (Contemporary Amperex Technology Co., Ltd.)

Situación actual: CATL [12] es hoy uno de los líderes mundiales en baterías para vehículos eléctricos (EVs) y almacenamiento estacionario. Además del tradicional litio-ión, está invirtiendo en sodio-ión, en baterías con carga ultrarrápida y en baterías para baterías intercambiables (battery swapping). En 2021 CATL reveló su primera batería de sodio-ión con densidad energética de hasta 160 Wh/kg, con buen comportamiento a baja temperatura, estabilidad térmica, y coste competitivo frente a LFP. En abril de 2025 CATL introduce la marca Naxtra, anunciando su batería de sodio-ión de producción masiva, con una densidad energética de 175 Wh/kg, que supone autonomía de unos 500 km para vehículos pasajeros, y más de 10.000 ciclos.

Productos y detalles técnicos: Utiliza azul de Prusia analógico para el electrodo positivo (cátodo) y carbono poroso para el electrodo negativo (ánodo). La primera generación de batería de ion sodio tenía una densidad energética específica de 160 Wh/kg, habiendo llegado actualmente a 175 Wh/kg con su batería Naxtra [13], cercana a los 185 Wh/kg de las baterías de litio de tipo LFP. Admite una carga de 5C y más de 10 000 ciclos de carga. También funciona bien en condiciones de frío extremo, ya que conserva el 93 % de su capacidad a -30°C. [<https://www.catl.com/en/news/6015.html>].

También ha anunciado para 2025 una segunda generación de su batería de sodio para carga rápida (Shenxing, [14]), pudiendo llegar a 200Wh/kg en generaciones futuras.

Aplicaciones objetivo: La aplicación principal en la que ha puesto el foco CATL es la de vehículos eléctricos de pasajeros, donde con su batería Naxtra ofrece autonomías atractivas en el entorno de los 500 km pero a menor coste y con buenas prestaciones para climas fríos (arranque hasta a -40°C). Por otro lado, para aplicaciones de almacenamiento estacionario las capacidades de densidad, seguridad y coste de esta tecnología son interesantes para respaldo en redes eléctricas e integración de energías renovables.

Alianzas y proyectos: CATL se ha aliado con los fabricantes de automóviles eléctricos NIO y GAC Aion para desplegar red de intercambio de batería (battery swapping). También coopera con el gobierno municipal de la ciudad de Nanjing para construir una “ciudad cero-carbono” que incluye proyectos fotovoltaicos, almacenamiento, electrificación del transporte, infraestructuras de carga y swapping, innovación energética, parques industriales y una cadena de reciclaje. Por último, tiene una joint-venture para fábrica de baterías LFP en Zaragoza (España) con una capacidad de hasta 50 GWh para el desarrollo de la estrategia de química dual (combinación de LFP con otras químicas como es el caso de sodio-ion).

Faradion

Situación actual: Faradion Ltd. [<https://faradion.co.uk/>] es una empresa con sede en Reino Unido (Sheffield / Oxford) fundada en ~2010-2011. En diciembre de 2021, Faradion fue adquirida por Reliance New Energy Solar Ltd. una filial de Reliance Industries (India), proceso de adquisición que finalizó en 2024.

Productos y detalles técnicos: Faradion utiliza actualmente óxidos en capas de sodio (sodium-nickel layered oxide). En cuanto al ánodo, y al igual que otras muchas empresas que desarrollan baterías de sodio-ion, utilizan hard carbon (carbono duro). El electrolito es líquido no acuoso, usando sales de NaPF_6 , entre otras. Se han encontrado referencias a densidades de energía de 160 Wh/kg a nivel de celda. Además del buen rendimiento y el buen comportamiento térmico, así como la estabilidad térmica de las celdas, se resalta la tecnología denominada “zero-volt” que significa que las celdas se pueden mantener sin tensión sin daño para las mismas, lo cual facilita el transporte, almacenamiento seguro y mantenimiento [15].

Aplicaciones objetivo: Faradion ha orientado su tecnología y sus productos hacia: almacenamiento estacionario para: integración con renovables, respaldo de redes eléctricas, microrredes, almacenamiento doméstico y comercial, aplicación esta última donde la seguridad, el bajo coste y la vida útil importa bastante. También en aplicaciones remotas, donde la infraestructura eléctrica no es robusta o donde las baterías necesitan soportar condiciones variables, transporte seguro, operabilidad con amplio rango de temperatura o un mantenimiento seguro. Además, para movilidad eléctrica, sustituyendo baterías de litio en micromovilidad (bicicletas, scooters, rickshaws) o vehículos ligeros.

Alianzas y proyectos: La más importante, la adquisición por parte de Reliance Industries, completada por Reliance New Energy Solar Ltd. en 2024, con intención de usar la tecnología de Faradion en la giga-fábrica de almacenamiento de energía en Jamnagar, India. También es destacable la joint venture entre Faradion y ICM Investments para instalar baterías en Australia; primera batería instalada en Yarra Valley [16].

Great Power (Guangzhou Great Power Energy & Technology)

Situación actual: Great Power, empresa china con experiencia en baterías recargables (Li-ion, plomo-ácido, etc.), fue una de las primeras en iniciar investigación en sodio-ion (desde 2019) y en 2023 ha dado el salto a proyectos comerciales de demostración [17]. En agosto de 2023 anunciaron el lanzamiento de un proyecto de almacenamiento de energía de 5 MW/10 MWh utilizando exclusivamente baterías de iones de sodio de Great Power, en un centro de datos en Qingdao [17]. Great Power ha desarrollado dos familias de químicas sodio-ion (óxido en capas y polianiónico) y afirma haber logrado ya la producción en pequeña escala de celdas. En 2023 obtuvo la aprobación nacional china como fabricante calificado de baterías Na-ion, al pasar las evaluaciones estándar de comportamiento y seguridad requeridas por el gobierno [18].

Productos y detalles técnicos: La tecnología de Great Power combina dos tipos de química: en sus propias palabras, siguen una “estrategia dual de óxidos en capas y sistemas polianiónicos” [19]. En los cátodos polianiónicos (p.ej. fosfatos o fluorofosfatos de metales de transición), Great Power ha logrado una altísima estabilidad, obteniendo más de 6000 ciclos de vida en laboratorio, aunque con densidad de energía modesta [17]. Por otro lado, en los cátodos de óxidos en capas (tipo NaxMeO_2 con Me = combinaciones de Fe, Mn, etc.), desarrollaron un sistema que alcanza cerca de 150 Wh/kg a nivel celda y hasta 3000 ciclos de vida útil [19]. La compañía cuenta con celdas de hasta 150 Ah y en su participación en el proyecto de Qingdao se incluye suministrar baterías de 587 Ah para lograr los 10 MWh del sistema [19]. En cuanto a rango térmico, las celdas de Great Power tienen amplio rango de operación (-40°C a 60°C) manteniendo una operación adecuada. Adicionalmente, destacan la seguridad: sus celdas han pasado pruebas de abuso severas, inherente a la química sodio y a sus diseños.

Aplicaciones objetivo: Las baterías sodio-ion de Great Power están dirigidas a ciertos vehículos eléctricos “de clase económica” (scooters, triciclos, coches eléctricos pequeños o híbridos, donde su batería podría reemplazar a las de litio LFP o a las de plomo) y sobre todo en centros de datos, donde la fiabilidad y costo por ciclo son cruciales. También apuntan a sistemas de energía estacionaria en red. Asimismo, la empresa enumera aplicaciones como fuentes de alimentación portátiles, energía de respaldo residencial e incluso sistemas marinos o aeronáuticos [20]. Su portafolio multi-química les permitiría usar la versión de larga vida para almacenamiento y la versión de mayor Wh/kg para movilidad.

Alianzas y proyectos: Great Power ha colaborado con Qingdao Beian Holdings (operador de data center) y Noan Technology para desplegar la solución Na-ion. Asimismo, participa en consorcios de la cadena de suministro, como por ejemplo asociándose con el fabricante de ánodos Hunan Yuneng para asegurarse el suministro de ánodos de carbono duro de calidad. La compañía también firmó en 2022 un MOU con un fabricante de vehículos especiales para probar baterías de sodio-ion en flotas de logística de bajo costo. A nivel internacional, Great Power tiene presencia (fábricas pequeñas) en países como Vietnam y la India para sus baterías de litio; no sería extraño que planee exportar sus baterías de sodio a mercados emergentes donde BYD/CATL aún no copan, ofreciendo licenciar su tecnología. Como logro reciente, en julio de 2023 fue incluida en la “primera lista” de empresas homologadas tras las nuevas normas chinas para baterías Na-ion, lo que la habilita para ventas masivas en el mercado doméstico [19].

HiNa (Hina Battery)

Situación actual: HiNa [21] es una empresa china especializada en el desarrollo y producción de baterías sodio-ion (Na-ion) concebidas como alternativa más barata y segura frente a algunas químicas a base de litio. En 2023, HiNa fue considerado el primer fabricante que integró celdas Na-ion en un vehículo eléctrico de pasajeros (Sehol E10X / JAC). En junio de 2024, suministró celdas para una planta de almacenamiento energético de 100 MWh en Qianjiang (Hubei), presentada como el mayor proyecto mundial con baterías sodio-ion en ese momento.

Productos y detalles técnicos: Los productos que comercializa son Celdas Na-ion cilíndricas y prismáticas en distintos formatos (pequeñas para electrónica/UPS y grandes para automoción/almacenamiento), Sistemas BESS modulares con integración de celdas Na-ion para aplicaciones de red (grid-scale) y micro-redes. NaCP73174207-ME185, con 185 Ah@2.0~3,95 V y una vida útil de 6000 ciclos (110 Wh/kg), o la NaCP73174207-ME200, con 200 Ah@2.0~3,95 V y 4000 ciclos de carga (120 Wh/Kg) [22]. La tecnología es capaz de trabajar a 3C y de mantener el 80% de su capacidad trabajando a -40°C.

La densidad energética anunciada en las gamas comerciales y notas de prensa rondan los 160-165 Wh/kg [23]. Indican también un número de ciclos de vida que sobrepasa los 8000 y promociona soluciones comerciales para vehículos que se cargan al 100 % en 20-25 minutos.

Aplicaciones objetivo: Enfoca su mercado en aplicaciones de almacenamiento para redes eléctricas, destinadas sobre todo a la estabilización de red, gestión de energía renovable respaldo y microrredes. Por otro lado, en el sector de la automoción se centra en coches urbanos de bajo coste, furgonetas y vehículos comerciales que priorizan coste por kWh, seguridad y tolerancia a carga rápida por encima de la densidad de energía. Por último, aplicaciones estacionarias de almacenamiento para UPS, telecomunicaciones y equipos industriales.

Alianzas y proyectos: Cabe destacar sobre todo la alianza con CBAK Energy en 2024 para la fabricación y comercialización de grandes celdas cilíndricas de sodio. En

cuanto a proyectos, el proyecto de BESS en Quianjiang, Hubei, en junio de 2024 con 100 MWh de baterías de sodio está considerado el mayor proyecto de puesta en marcha de baterías de este tipo.

Li-Fun

Situación actual: Li-FUN (Li-Fun Technology Co., Ltd.), con sede en Zhuzhou, Hunan, China, es una empresa fundada en 2013, con actividades en fabricación de baterías de iones de litio, investigación y desarrollo, y según varias fuentes ha ampliado su foco a otras químicas, incluyendo sodio-ión (Na-ion) [24]. Su primera generación de celdas Na-ion aparecería en 2022 (junio) como producción de prototipos en forma de celdas tipo pouch (bolsa), con producción más grande en 2023.

Productos y detalles técnicos: La primera generación de celdas fabricadas tenía una densidad de 140 Wh/kg 240 Wh/l, aunque la producción esperada en la siguiente generación tiene valores más altos de densidad que se estiman en 160 Wh/kg y 280 Wh/l. Las celdas tienen un ciclo de vida de 4000 ciclos y son capaces de mantener una capacidad del 88 % a temperaturas de hasta -20°C.

Aplicaciones objetivo: Las aplicaciones identificadas por Li-Fun para sus productos son: vehículos eléctricos de bajo coste y baja velocidad, como automóviles sencillos o utilitarios eléctricos dentro de entornos controlados, donde las densidades de energía de 160 Wh/kg pueden ser suficientes.; sistemas de almacenamiento estáticos para respaldo de red e integración con renovables.

Alianzas y proyectos: Colaboración con Echion Technologies en noviembre de 2023 para suministrar material de ánodo basado en niobio (su marca “XNO®”) y acceder al soporte en electroquímica de Echion. Se usa para explorar celdas/baterías con mayor rendimiento. Li-Fun ha licenciado / ampliado su relación con Amionx para integrar la tecnología SafeCore®, diseñada para mejorar la seguridad (prevenir o mitigar thermal runaway, sobrecarga, cortocircuitos internos, etc.) en baterías, incluidas baterías con químicas alternativas.

NaTRIUM Energy (Zhejiang Na Innovation Energy)

Situación actual: NaTRIUM Energy es una empresa china, fundada en 2018, formalmente Zhejiang Na Innovation Energy Co., enfocada en materiales para baterías de sodio-ion y en el desarrollo de celdas propias. Se encuentra principalmente en fase de industrialización de materiales más que de productos comerciales finales. De hecho, su estrategia es proveer de materiales clave a fabricantes de baterías sodio-ion a gran escala, convirtiéndose en “pionera global” en la cadena de suministro de esta tecnología [25]. No obstante, NaTRIUM también ha desarrollado celdas completas como demostración de su química, aunque no hay información concreta al respecto.

Productos y detalles técnicos: La especialidad de NaTRIUM son los materiales de electrodo. Han desarrollado un cátodo de óxido en capas con composición $\text{Na}_x(\text{Ni}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ (sodio-níquel-hierro-manganeso) combinado con ánodo de carbono duro [26]. Esta química de tipo camada O3 es análoga

a la de ciertas baterías NMC de litio, optimizada para iones de sodio. Con ella, NaTRIUM logró celdas de sodio-ion con densidad de energía en el rango de 130-160 Wh/kg a nivel celda [26]. En 2023 la empresa obtuvo un premio nacional de invención por un proceso verde de fabricación de cátodos que mejora estabilidad y ciclabilidad. En términos de temperatura operativa, las celdas de NaTRIUM funcionan típicamente entre 0 y 45°C (rango estándar). La empresa también desarrolla materiales tipo Prussian blue (hexacianoferratos) como otra vía para cátodos sodio-ion [27], pero su enfoque principal es el óxido en capas Ni-Fe-Mn.

Aplicaciones objetivo: NaTRIUM menciona que las baterías sodio-ion están pensadas para sistemas estacionarios de energía (respaldo de centros de datos, energías renovables) y para vehículos eléctricos de baja autonomía (motos eléctricas, vehículos urbanos pequeños) [28], y por tanto orienta su tecnología a dos grandes campos: almacenamiento estacionario y movilidad eléctrica asequible. Esto coincide con la realidad del mercado: las celdas de 130-160 Wh/kg son apropiadas para almacenar energía en red o en el hogar a bajo costo, o para vehículos donde una gran autonomía no es prioritaria. Motos eléctricas de fabricantes chinos han probado celdas sodio-ion con cátodos de NaTRIUM. Asimismo, en vehículo eléctrico ligero, NaTRIUM colabora con empresas locales para adaptar baterías Na-ion en automóviles [29]. En general, sus materiales están pensados para servir de base a baterías que reemplacen baterías de plomo y complementen a las de litio LFP en aplicaciones sensibles al coste o al frío.

Alianzas y proyectos: NaTRIUM Energy mantiene estrecha cooperación con instituciones académicas ya que sus fundadores provienen del ámbito universitario. A nivel comercial, NaTRIUM fue una de las primeras empresas en China en firmar contratos de suministro de materiales de sodio-ion para proyectos demostrativos. Por ejemplo, proveyó materiales al proyecto de la central de Three Gorges (China Three Gorges Corp) que inauguró en 2022 una línea de baterías de sodio de escala GWh [28]. En junio de 2022 anunciaron un proyecto para construir fábricas para producción de 80.000 toneladas/año de materiales de cátodo y electrolito de sodio-ion en el parque industrial de Shaoxing (China) durante los próximos 3-5 años [28]. También participa en estándares: en 2023 se publicó la primera norma nacional china de baterías de sodio-ion para almacenamiento, con aportes de NaTRIUM en su desarrollo [29].

En cuanto a joint-ventures, NaTRIUM ofrece materiales a compañías como CATL, HiNa o Faradion.

Natron Energy

Situación actual: Natron Energy era una empresa estadounidense enfocada en fabricar baterías de sodio-ion (Na-ion), para aplicaciones industriales/comerciales críticas como respaldo eléctrico, modulación de picos de demanda, centros de datos, telecomunicaciones y cargadores rápidos de vehículos. Comenzó la fabricación comercial a escala en su planta de Holland, Michigan, alrededor de abril-mayo de 2024, con capacidad para ~600 MW al año. En agosto de 2024 anunció la intención de construir una giga-factoría en Edgecombe County, Carolina del Norte, (EEUU) con una inversión de cerca de US\$1.4 mil millones.

Sin embargo, en septiembre de 2025, Natron Energy informó del cierre permanente de su planta en Michigan, cierre de oficinas centrales en Santa Clara, y cancelación del proyecto de la giga-factoría en Carolina del Norte, debido a que no logró la financiación suficiente.

Productos y detalles técnicos: Natron usaba una química basada en Prussian blue (“azul de Prusia”) para los electrodos. El “Prussian blue” supone una estructura de tipo “caja cúbica” en la que los iones sodio (Na⁺) pueden entrar y salir con buena movilidad, aprovechando cavidades vacías entre la estructura cristalina. Natron ofrecía una familia de productos bajo marcas como BluePack™, BlueRack™ y BlueTray™, con logros técnicos destacados sobre todo en el número de ciclos de descarga profunda, los cuales la empresa afirma que son más de 50.000 ciclos para algunos productos. Por otro lado, los productos de Natron no compiten con las baterías Li-ion de alta densidad para aplicaciones móviles de largo alcance. Sin embargo, en almacenamiento estacionario o respaldo, la densidad energética no es la prioridad, sino ciclos, seguridad y potencia.

Aplicaciones objetivo: Las principales aplicaciones en las que se enfocaron fueron: la asistencia a centros de datos con respaldo crítico, calidad de energía, mitigación de picos de demanda; soporte a telecomunicaciones y equipos críticos industriales; UPS donde la seguridad, la velocidad de respuesta y la durabilidad es más importante que la densidad energética; y uso de baterías como buffer o para suavizar la demanda eléctrica en estaciones de carga rápida de vehículos eléctricos [30].

Alianzas y proyectos: Es destacable la Alianza con DG Matrix para desplegar soluciones de cargadores rápidos EV usando las baterías BluePack de Natron como elemento intermedio de almacenamiento para reducir las exigencias desde el punto de vista de potencia a la red. El proyecto de la giga-factoría de Carolina del Norte (EEUU), anunciada en agosto de 2024 para producción de ~24 GW anuales, con creación estimada de unos 1.000 empleos, incentivos estatales, etc., no llegó a llevarse a cabo por falta de financiación.

Nippon Electric Glass (NEG)

Situación actual: La compañía japonesa Nippon Electric Glass (NEG) ha desarrollado una batería recargable de sodio-ion completamente de estado sólido y basada en óxidos (sin líquidos ni polímeros) [31]. Desde 2021 lograron prototipos operativos, y en 2024 comenzaron a enviar muestras de estas baterías a clientes para evaluación [32]. NEG planea comercializar esta tecnología hacia 2025, enfocándose en nichos donde sus ventajas únicas aportan valor.

Productos y detalles técnicos: La batería de NEG utiliza materiales vítreos (cristalizados) tanto en el cátodo como en el ánodo, junto con un electrolito sólido cerámico – todos compuestos inorgánicos de óxidos [31]. Esto le otorga alta seguridad (no inflamable ni produce gases incluso bajo abuso mecánico) y una muy amplia tolerancia térmica [32]. De hecho, sus celdas funcionan desde -40°C hasta +200°C, un rango sin precedentes en baterías secundarias.

A alta temperatura ($\approx 200^{\circ}\text{C}$) pueden admitir tasas de carga ultrarrápidas (hasta 20C, es decir, carga completa en ~ 3 min) gracias a la mejor conductividad iónica. La celda ofrece ~ 3 V de voltaje nominal y un rendimiento electroquímico comparable al de baterías de iones de litio comerciales.

Aplicaciones objetivo: Debido a su seguridad extrema y desempeño térmico, NEG se orienta inicialmente a aplicaciones especializadas: industria aeroespacial, equipos de fabricación de semiconductores (ambientes de alta temperatura), dispositivos médicos y equipamiento en entornos extremos [32]. También vislumbran su uso en almacenamiento estacionario y en automoción, especialmente para climas muy fríos o extremadamente cálidos, donde las baterías convencionales fallan. La empresa destaca que esta tecnología, al prescindir de metales críticos, podría contribuir a la transición energética de forma sostenible y económica en el largo plazo [31].

Alianzas y proyectos: En 2024 NEG inició colaboraciones con clientes para implementar proyectos piloto usando sus baterías de sodio-ion de estado sólido [32]. No se han anunciado aún joint ventures productivas con otros fabricantes, pero el envío de muestras marca un paso importante hacia asociaciones comerciales. La compañía mantiene en su web información y comunicados oficiales sobre esta batería (llamada a veces “All-Oxide All-Solid-State Na-ion battery”). Si bien no se reporta aún producción en masa, NEG proyecta que la comercialización de esta tecnología ocurrirá próximamente, tras validar su desempeño en las aplicaciones señaladas.

REPT BATTERO

Situación actual: REPT Battero, empresa china respaldada por el gigante del acero Tsingshan, está explorando activamente las baterías de sodio-ion pero aún no comercializa productos de esta química. Debido a la reciente caída de precios del litio, la ventaja de costo del sodio se ha reducido y la empresa se muestra cautelosa en invertir a gran escala. REPT permanece en etapa de I+D.

Productos y detalles técnicos: REPT ha presentado al menos un prototipo de celda sodio-ion de 92 Ah en su portafolio de “frontier cells” [33]. La compañía describe esta celda como una solución de bajo coste y libre de cobalto, con excelente desempeño a bajas temperaturas [33]. REPT se propone que sus desarrollos busquen equilibrar alta densidad energética y larga vida útil mediante innovaciones en materiales (por ejemplo, membranas “reemplazadoras de sodio” patentadas para mejorar la ciclabilidad) [34].

Aplicaciones objetivo: REPT Battero es uno de los mayores proveedores de baterías LFP para almacenamiento estacionario (ESS) y vehículos en China. Por ello, es previsible que REPT enfoque sus baterías Na-ion hacia almacenamiento estacionario en red, almacenamiento residencial/industrial y quizá vehículos eléctricos de gama baja o para climas fríos donde el sodio ofrece ventajas de temperatura. Hasta ahora no ha anunciado integraciones en vehículos. Su estrategia sería introducir sodio-ion en ESS primero (donde el peso/volumen son menos críticos) y evaluar su viabilidad en movilidad ligera o vehículos eléctricos económicos conforme madure la tecnología.

Alianzas y proyectos: No se han reportado aún alianzas estratégicas específicas de REPT para sodio-ion. A destacar que la empresa cuenta con el apoyo financiero de Tsingshan.

SUNGROW

Situación actual: Sungrow, líder mundial en inversores fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento, ha dado un giro estratégico para producir sus propias baterías, incluyendo tecnología sodio-ion. Históricamente Sungrow actuaba solo como integrador de baterías (comprando celdas a terceros como CATL, EVE, REPT, etc.), pero en mayo de 2024 inició la construcción de su primera fábrica de baterías en Da’an (provincia de Jilin, en China), con fuerte énfasis en químicas alternativas al litio, destacando una planta de baterías sodio-ion y una de baterías de flujo de hierro [35]. Actualmente (2025) la empresa no comercializa aún baterías de sodio, pero su compromiso inversionista sugiere que ve en esta tecnología un pilar futuro.

Productos y detalles técnicos: Dado que la producción no ha iniciado, Sungrow no ha presentado todavía un modelo de batería sodio-ion específico. Sin embargo, la nueva planta incluirá también una fábrica de ánodo nano-silicón-carbono de 6000 toneladas/año [36], lo que podría indicar que Sungrow está investigando ánodos compuestos (quizá mezclando carbono duro con nano-silicio para mejorar capacidad, tecnología que también se aplica en litio). Se puede inferir que Sungrow desarrollará celdas prismáticas de gran formato enfocadas en almacenamiento estacionario (por ejemplo, celdas >100 Ah, $\sim 3,2$ V nominales) para integrarlas en sus contenedores.

Aplicaciones objetivo: La motivación principal de Sungrow al invertir en sodio-ion es fortalecer su posición en almacenamiento estacionario a gran escala (BESS) con una química más económica y segura que el ion-litio. Sungrow ha suministrado más de 10 GW de sistemas de almacenamiento globalmente, especialmente en plantas solares + almacenamiento [37]. Con baterías sodio-ion propias, podrá ofrecer soluciones de almacenamiento 100% libres de litio para proyectos en red, almacenamiento de energías renovables y aplicaciones de larga duración. Es de esperar que las baterías Na-ion de Sungrow se usen para parques solares/eólicos, almacenamiento de servicios públicos (utility-scale), microredes industriales e incluso para respaldo en proyectos de hidrógeno verde (Sungrow está construyendo un parque demostrativo de hidrógeno en la misma ubicación) [37]. Adicionalmente, podrían destinarse a almacenamiento residencial/comercial a través de sus inversores+baterías integrados, si logran densidades aceptables. Dado que Sungrow no fabrica vehículos, el segmento de movilidad no es su objetivo.

Alianzas y proyectos: En 2024 Sungrow creó una filial especializada, Anhui Xuanyang Power Technology, dedicada a fabricación de baterías y servicios de almacenamiento. Esto marca la transición de integrador a fabricante. La construcción de la base en Jilin se está llevando a cabo en cooperación con el gobierno local, que apoya el desarrollo industrial de tecnologías como sodio-ion. En cuanto a proyectos concretos, aún no se han desplegado baterías Na-ion de Sungrow en campo (dado que no se producen aún).

Cabe mencionar que Sungrow, como integrador, ha suministrado sistemas con baterías de otros (p. ej. LFP) en todo el mundo, pero todavía no existe un proyecto público con sus “propias” baterías sodio-ion.

SVOLT Energy Technology

Situación actual: SVOLT es una escisión del fabricante chino de automóviles Great Wall Motor que ha entrado en el desarrollo de la tecnología de sodio-ion en paralelo a sus baterías de litio. Actualmente SVOLT se encuentra en fase de desarrollo avanzado de prototipos de sodio-ion. A finales de 2022, SVOLT anunció la finalización de su primera generación de baterías Na-ion y marcó una hoja de ruta de desarrollo en varias etapas [38]. Se sabe que SVOLT ha invertido en líneas de producción de materiales para Na-ion (por ejemplo, un proyecto de ánodo de carbono duro en Changzhou) [39].

Productos y detalles técnicos: SVOLT ha revelado tres generaciones de prototipos: su 1ª generación (2022) consistió en una celda prototipo de 100-110 Wh/kg; la 2ª generación (inicios de 2023) surgió con un objetivo de 135 Wh/kg [38], incorporando optimizaciones de materiales de cátodo/ánodo (no han detallado públicamente la química); y la 3ª generación apuntó a lograr 160 Wh/kg y más de 2000 ciclos de vida manteniendo la capacidad por encima del 80 %. SVOLT menciona que su batería Na-ion tendrá ventajas en baja temperatura y carga rápida, comparables o superiores a una LFP convencional [38]. Aunque no han divulgado la composición química, es probable que utilicen un cátodo de Prussian White o óxido con dopantes y ánodo de carbono duro, para alcanzar dichos parámetros. Cabe destacar que SVOLT está trabajando también en baterías híbridas Li-Na (donde celdas de sodio y de litio se combinan en un pack para equilibrar densidad y coste, tecnología similar a la que propone CATL).

Aplicaciones objetivo: SVOLT, proveniente del sector automotriz, orienta por tanto sus baterías Na-ion principalmente a vehículos eléctricos económicos. SVOLT ha declarado que ve estas baterías más adecuadas para vehículos de gama baja, microcoches urbanos, vehículos de baja velocidad y motocicletas eléctricas, donde la densidad menor no compromete seriamente el alcance [38]. Asimismo, se espera su uso en sistemas de 48V para híbridos leves o arranque, reemplazando plomo-ácido. Otro campo de interés es el almacenamiento estacionario. SVOLT podría implementar sodio-ion en baterías fijas para energía solar/eólica donde importe más el costo y la seguridad que la capacidad. De hecho, la ventaja de sodio en clima frío puede aprovecharse en baterías estacionarias en regiones frías sin necesidad de climatización.

Alianzas y proyectos: SVOLT colabora estrechamente con Great Wall Motor (su empresa matriz) para eventual adopción de sodio-ion en vehículos. A nivel industrial, SVOLT ha establecido centros de I+D en China y Alemania donde trabaja en sodio-ion junto a universidades e institutos (por ejemplo, cooperación con la Universidad de Tsinghua en materiales de sodio). En cuanto a fabricación, SVOLT estaría adaptando una de sus plantas piloto en Changzhou para

producir las primeras celdas sodio-ion en pequeñas series [39]. SVOLT también participa en proyectos gubernamentales de demostración y es miembro de la Alianza China de Baterías que promueve sistemas sodio-ion en la red para 2025.

TIAMAT

Situación actual: Tiamat es una startup francesa fundada en 2017 como spin-off del CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) y del CEA, en el marco del consorcio/investigación RS2E (Red de Almacenamiento Electroquímico de Energía).

Productos y detalles técnicos: Esta empresa Utilizan celdas cilíndricas tipo 18650. Tienen dos líneas tecnológicas de producto. La Gen1 es una tecnología orientada a alta potencia, con densidades energéticas de entre 90 y 110 Wh/kg y con descarga continuas de 30C y de pulsos de hasta 100C, con densidades de potencia de 2 a 5 kW/kg [40]. Es capaz de mantener su capacidad por encima del 80 % durante 5000 ciclos [41]. La Gen2 es una tecnología orientada a mayor densidad energética, principalmente movilidad, donde se esperan valores de entre 140 y 160 Wh/kg.

Aplicaciones objetivo: La empresa ha apostado por aplicaciones para herramientas eléctricas, donde la potencia, seguridad y capacidad de carga rápida son las características más importantes, y no tanto la densidad de energía. También para el almacenamiento estacionario, para centros de datos, respaldo eléctrico y recorte de picos de consumo, aplicaciones donde la seguridad, los ciclos de vida y el coste tienen una gran importancia. En cuanto a las aplicaciones en movilidad, apuestan por la movilidad ligera y las aplicaciones de baja autonomía.

Alianzas y proyectos: En enero de 2024, Tiamat cerró una ronda de financiación de \approx €30 millones con participación de Stellantis Ventures, Arkema, MBDA, además de inversores históricos y el banco de inversión público francés Bpifrance [42]. Tiamat tiene intención de construir una planta de producción de celdas de sodio-ion en Boves, la región Hauts-de-France, cerca de Amiens.

[<https://www.electrive.com/es/2024/01/12/tiamat-construir-una-fabrica-de-5-gwh-de-baterias-de-ion-na-en-francia>] con un objetivo de capacidad para fabricar 5 GWh/año para el año 2029. La primera fase, \sim 0.7 GWh anual estaría operativa entre 2025 y 2026, con más de 1.000 empleos asociados a la fábrica [42].

TRANSIMAGE TECH (Jiangsu Transimage Sodium Battery)

Situación actual: Transimage es una empresa tecnológica china que ha dado un salto de producción de componentes electrónicos al mercado de baterías de sodio-ion, logrando ya producción inicial y primeras ventas. Transimage fundó en 2022 una división específica de baterías Na-ion y montó líneas de fabricación piloto [43]. A inicios de 2023 sus fábricas alcanzaron la “producción en masa” de celdas sodio-ion, con capacidad instalada de \sim 4,5 GWh/año [43]. De hecho, Transimage informó haber producido 3,69 millones de celdas

cilíndricas en el primer semestre de 2023 (principalmente formato 18650), logrando sólo en el mes de junio un ritmo de >2 millones de celdas [43]. Comercialmente, Transimage obtuvo en julio 2023 un pedido de un fabricante de automóviles alemán (no revelado) para suministro de baterías sodio-ion para vehículos, convirtiéndose en la primera empresa china en anunciar un pedido internacional de baterías Na-ion. En paralelo, Transimage desplegó en 2024 un sistema de almacenamiento de 5 MWh con sus baterías en Jiangsu, marcando otro hito comercial. Transimage ya pasó de I+D a producción piloto-comercial: vende celdas para aplicaciones reales (vehículos ligeros, ESS), con planes de expansión agresivos.

Productos y detalles técnicos: Transimage fabrica principalmente celdas cilíndricas sodio-ion y también desarrolla celdas prismáticas de gran tamaño. En formato cilíndrico, ha producido millones de celdas 18650 (18x65 mm) de ~1,3 Ah, 3,05 V nominales, con más de 3000 ciclos, pudiendo descargar a 6C y con excelente rendimiento -40 °C [44]. En celdas prismáticas, Transimage cuenta con un modelo de 210 Ah (formato 173x71x204 mm), con 3,1 V nominales, densidad mayor a 140 Wh/kg, resistencia interna $\leq 0,5 \text{ m}\Omega$ y soporta descargas continuas de 1C (210 A) y picos de 3C [45]. Utiliza cátodo de óxido en capas (probablemente $\text{Na}_x[\text{Fe}/\text{Mn}]\text{O}_2$ optimizado) y ánodo de carbono duro de biomasa, lo que le confiere excelente comportamiento a baja temperatura (puede operar hasta -40°C, aunque con reducción de potencia) y larga vida (4000 ciclos al 80 % de capacidad).

Aplicaciones objetivo: Transimage está posicionando sus baterías sodio-ion tanto en movilidad eléctrica como en almacenamiento estacionario. En el frente de movilidad, el hecho de haber ingresado al suministro de un fabricante alemán sugiere uso en vehículos eléctricos – posiblemente en modelos híbridos o urbanos de corta autonomía donde el sodio puede ser competitivo. Sus celdas cilíndricas 18650/26700 parecen dirigidas a motos eléctricas, bicicletas eléctricas y vehículos de baja velocidad, por su tamaño y potencia, donde el coste reducido y seguridad extra del sodio ofrecen ventajas. Esto concuerda con la tendencia de reemplazar baterías de plomo por celdas cilíndricas Na-ion en e-bikes y scooters. Por otro lado, las celdas prismáticas de 210 Ah están orientadas a vehículos industriales (maquinaria) y almacenamiento estacionario [45]. En cuanto a almacenamiento estacionario comercial/industrial – data centers, renovables, UPS de telecomunicaciones, donde se buscan ciclos largos sin riesgo térmico. Transimage es una de las pocas empresas con experiencia real multi-segmento en sodio-ion.

Alianzas y proyectos: Transimage ha logrado hitos notables en alianzas comerciales. El más significativo es el acuerdo con un fabricante de automóviles alemán (no revelado) alcanzado en 2023. Aunque el pedido inicial es de pequeña magnitud, esta alianza abre la puerta a colaboraciones de mayor escala si las baterías cumplen las expectativas. En el ámbito estacionario, Transimage colaboró con autoridades locales en Jiangsu para desplegar el sistema de 5 MWh / 1 MWh (5 MW, 1 h) de almacenamiento con sodio [45], que se considera un proyecto demostrativo importante en China. Asimismo, la empresa ha establecido un Instituto de Investigación de Baterías de Sodio-ion en 2022 como plataforma de I+D [46],

posiblemente en cooperación con universidades locales en Jiangsu. En términos de inversiones, Transimage está cotizada en Shenzhen, lo que le permitió obtener capital para escalar producción; sus anuncios a la bolsa mencionan planes de expansión de capacidad conforme la demanda crezca. La compañía forma parte del ecosistema de sodio chino y aparece en rankings de los Top 10 fabricantes de baterías de sodio en China. En agosto de 2024 Transimage firmó un contrato para una central de almacenamiento en colaboración con autoridades de Gaoyou (su ciudad sede en China).

ZONERGY CORPORATION

Situación actual: Zonergy, conocida por sus soluciones solares y de almacenamiento, se ha posicionado también como pionera en baterías de sodio-ion en China. La compañía (con sede en Sichuan) ya opera proyectos de demostración con baterías Na-ion y avanza hacia la comercialización inicial. En junio de 2024 inauguró un proyecto integrado de generación fotovoltaica + almacenamiento con baterías de sodio en Zigong (Sichuan), considerado el primer sistema de almacenamiento con sodio-ion en operación del mundo en su tipo [47]. Zonergy ha pasado del laboratorio a la implementación piloto real, situándose como una de las primeras en llevar el sodio-ion al campo.

Productos y detalles técnicos: Zonergy ha desarrollado una familia de celdas prismáticas de sodio-ion de distintas capacidades, bajo la serie Apollo. En 2024 presentó tres modelos principales de celda: 20 Ah, 75 Ah y 160 Ah - todas de formato prismático, idóneas para módulos estacionarios. Estas celdas operan con voltaje nominal cerca de 3,0 V y muestran densidades de energía desde 110 Wh/kg (en la celda de 160 Ah) hasta ~150 Wh/kg (en la de 20 Ah) [48], valores comparables a las baterías LFP. Sus vidas útiles alcanzan ≥ 2.500 ciclos para las celdas pequeñas y ≥ 5.000 ciclos en la de 160 Ah. La nomenclatura “NaNFM”/“NFPP” sugiere óxidos en capas de Na (NFM: sodio-hierro-manganeso) y posiblemente $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ u otro polianiónico de Fe para la celda de 160 Ah. Un punto fuerte es el rendimiento térmico: conservan ~90% de su capacidad a -20°C, y alrededor de 85 % a -40°C, comportamiento muy superior al de Li-ion tradicional. Esto se logra con un cátodo polianiónico de sodio (Zonergy menciona estar a la cabeza en baterías de sodio de tipo “polianiónico”) combinado con ánodo de carbono duro. Las celdas admiten también descargas rápidas: por ejemplo, el modelo de 75 Ah tiene resistencia interna $\sim 0,5 \text{ m}\Omega$ y puede entregar corrientes elevadas.

Aplicaciones objetivo: Zonergy enfoca sus baterías de sodio en sectores donde la seguridad y el coste priman sobre la densidad de energía. Según la propia empresa, las Na-ion tienen “más potencial en campos con requisitos moderados de densidad, pero alta sensibilidad a la seguridad y el costo” [49]. En concreto, destacan: almacenamiento distribuido (desde sistemas residenciales hasta backup en telecomunicaciones y parques industriales), vehículos eléctricos de baja velocidad y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) o respaldo en red [49]. Ejemplos: baterías para torres de telecomunicaciones, para microrredes solares domésticas, para bicicletas y triciclos eléctricos, carros de golf, e incluso vehículos eléctricos urbanos de baja velocidad. También mencionan aplicaciones en barcos eléctricos lentos y autobuses turísticos de baja velocidad [49][8].

Alianzas y proyectos: Su proyecto emblemático es el mencionado sistema de Sichuan Zigong, realizado con apoyo de autoridades locales y alianzas en el marco de la China Energy Storage Alliance (CNESA) [47]. También colabora estrechamente con el Instituto de Estandarización Electrónica de China (CESI) en el desarrollo de estándares, habiendo participado activamente en el desarrollo del estándar industrial chino para baterías de sodio y elaborado la “Hoja de Ruta de Tecnología de Baterías de Sodio-ion en China” [47]. Zonergy ya integró sus celdas en un pequeño sistema estacionario de 5 MWh conectado a la red en Jiangsu [49], en colaboración con una empresa eléctrica local.

ZOOLNASM ENERGY

Situación actual: Zoolnasm (Jiangsu Zoolnasm Energy Tech) es una startup china fundada en 2021. Se ha posicionado como uno de los líderes emergentes en baterías de sodio-ion. Actualmente está pasando de la etapa piloto a la comercial, con entregas iniciales de baterías a clientes y una fábrica en construcción. En 2023, Zoolnasm comenzó a suministrar sus baterías a fabricantes de motocicletas eléctricas de primer nivel en China (Yadea, Aima, Xinri, TailG, etc.) [50]. En noviembre de 2023 inició la construcción de su primera planta de producción en Guangde (Anhui), en China, con capacidad planeada de 20 GWh anuales en celdas de sodio-ion [51].

Productos y detalles técnicos: Zoolnasm ha desarrollado varias líneas de celdas de sodio-ion bajo la serie NFS (Na-Fe-SO₄ o sulfato de hierro sódico). Su tecnología tiene un cátodo basado en compuestos polianiónicos ricos en hierro, combinado con ánodo de carbono duro [52]. Destacan dos tipos de producto: (a) Celdas de alta potencia para arranque de vehículos y UPS, y (b) celdas de alta capacidad para movilidad eléctrica ligera y almacenamiento estacionario. En abril de 2024 se lanzó la celda NFS-50, considerada la primera celda Na-ion de alta tasa de descarga del mundo. Es una celda tipo pouch de 50 Ah de capacidad, 3.6 V de tensión nominal, descargas de 10C, con 100 Wh/kg de densidad energética y más de 5000 ciclos de vida útil [52]. La química NFS reduce el costo en cerca de un 50 % comparado con una batería de litio equivalente [53]. Por otro lado, Zoolnasm produce celdas orientadas a energía de entre 25 Ah y 420 Ah, con buen rendimiento a baja temperatura (85 % de capacidad a -20°C).

Aplicaciones objetivo: Zoolnasm apunta principalmente al mercado de movilidad eléctrica ligera y sistemas de reemplazo de baterías de plomo-ácido. Sus primeras ventas han sido para bicicletas y motos eléctricas, por ejemplo, baterías Jūnà 1 integradas en scooters de las marcas chinas Aima y Xinri, lanzadas en 2024 [50]. Estas baterías ofrecen a las e-bikes mayor autonomía y vida útil que las de plomo, con un coste competitivo, similar a baterías de plomo) [50]. También se orientan a vehículos eléctricos de baja velocidad y triciclos de reparto, sectores muy sensibles al coste. Otro foco es la sustitución de baterías de arranque de plomo por otras más ecológicas y duraderas en coches convencionales y sistemas microhíbridos [51]. Adicionalmente, Zoolnasm menciona el uso de sus celdas de gran capacidad (420 Ah) para aplicaciones en almacenamiento estacionario residencial e industrial y para energías renovables [54]. La empresa enfatiza que las baterías de Na-ion encajan bien donde la densidad de energía moderada es aceptable, pero se requieren bajo costo, larga vida y seguridad.

Alianzas y proyectos: Zoolnasm ha establecido colaboraciones con varios fabricantes líderes de vehículos ligeros eléctricos en China. En 2023 firmó un acuerdo estratégico con TailG (e-bikes) para proveer 2 millones de baterías Jūnà 1 en dos años [51], y trabaja conjuntamente en desarrollar la siguiente generación de baterías de sulfato de hierro-sodio optimizadas para este sector. Asimismo, mantiene cooperación con JAC en un proyecto con un vehículo eléctrico urbano Sehol con batería de sodio-ion. En el ámbito industrial, Zoolnasm participó en 2022 en la creación de un estándar nacional de baterías de sodio para bicicletas eléctricas, siendo de las primeras en certificar un producto conforme a dicha norma [54]. En cuanto a su producción, además de la gigafactoría en construcción (20 GWh en celdas + 10 GWh en sistemas), la empresa opera desde 2022 una planta piloto de materiales catódicos de ~100 ton/año para asegurar el suministro de sus propios componentes.

La Tabla 5 muestra un resumen de las empresas fabricantes de Na-ion analizadas.

| Fabricante | País / Sede | Estado Actual | Densidad Energética | Ciclos de Vida | Rango Temperatura | Aplicaciones Clave |
|-----------------------------|-------------|------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------|--|
| Altris | Suecia | Producción piloto (materiales) | >160 Wh/kg | N/D | N/D | BESS, movilidad ligera, UPS, barcos eléctricos |
| BYD (FinDreams) | China | Construcción de planta (30 GWh) | N/D | N/D | N/D | Microvehículos, BESS |
| CALB | China | I+D (patente 2025) | N/D | N/D | N/D | BESS, movilidad ligera |
| CATL | China | Producción comercial | 175 Wh/kg | > 10.000 | -40°C a +60°C | Vehículos eléctricos (alcance ~500 km), BESS |
| Faradion | UK / India | Producción comercial | 160 Wh/kg | N/D | Amplio rango | BESS, movilidad ligera, microrredes |
| Great Power | China | Producción piloto | 150 Wh/kg | 3000-6000 | -40°C a +60°C | BESS, data centers, vehículos económicos |
| HiNa | China | Producción comercial | 160-165 Wh/kg | 8000 | -40°C a +60°C | BESS, coches urbanos, UPS, telecom |
| Li-Fun | China | Precomercial | 140-160 Wh/kg | 4000 | -20°C (88 %) | Vehículos urbanos de bajo coste, BESS |
| NaTRIUM Energy | China | Producción comercial (materiales) | 130-160 Wh/kg | N/D | 0°C a 45°C | BESS, movilidad ligera |
| Natron Energy | EE.UU. | Cerró operaciones en 2025 | N/D | 50.000 | Amplio | UPS, data centers, cargadores rápidos |
| Nippon Electric Glass (NEG) | Japón | Prototipos enviados a clientes | ≈150 Wh/kg | N/D | -40°C a +200°C | Aeroespacial, industrial, médico, BESS |
| REPT Battero | China | I+D | N/D | N/D | N/D | BESS, vehículos económicos |
| Sungrow | China | Construcción de planta | N/D | N/D | N/D | BESS a gran escala |
| SVOLT | China | Precomercial | 110-160 Wh/kg | 2000 | -40°C | Vehículos urbanos, híbridos 48V, BESS |
| Tiamat | Francia | Producción piloto (prevista 2025) | 90-160 Wh/kg | 5000 | N/D | Herramientas, movilidad ligera, BESS |
| Transimage | China | Producción comercial (4.5 GWh/año) | 140 Wh/kg | 4000 | -40°C | Vehículos ligeros, BESS |
| Zonergy | China | Precomercial | 110-150 Wh/kg | 2500-5000 | -20°C a -40°C | BESS, telecomunicaciones, scooters, barcos |
| Zoolnasm | China | Construcción de planta (20 GWh) | 100-140 Wh/kg | 5000 | -20°C (85 %) | Bicicletas, scooters, plomo-ácido, BESS |

Tabla 5. Resumen de los fabricantes de baterías Na-ion.

Conclusiones del análisis de fabricantes de baterías de sodio-ion

En cuanto a la madurez tecnológica:

- El desarrollo de baterías de sodio-ion ha avanzado rápidamente en los últimos 3-4 años, pasando de fase experimental a **producción piloto e incluso comercial**.
- **China lidera el desarrollo y producción de las baterías de ion sodio¹**. Empresas como **CATL, HiNa, Transimage y Zoolnasm** ya producen baterías Na-ion a escala industrial, mientras que otras como **BYD, Sungrow, CALB o REPT** están aún en fases de I+D o construcción de fábricas.
- Aunque el sodio todavía **no reemplaza al litio en aplicaciones de alta densidad energética**, ya es competitivo en **segmentos de bajo coste, movilidad ligera y almacenamiento estacionario**.

En cuanto a aplicaciones:

- **Almacenamiento estacionario (BESS)**. Integración con renovables, respaldo de red y data centers, donde peso y densidad no son críticos, pero sí seguridad, coste por ciclo y duración. Sungrow, Great Power, Zenergy, HiNa y CATL.
- **Movilidad eléctrica ligera y vehículos de bajo coste**. Bicicletas, scooters, triciclos y coches urbanos económicos. Las empresas líderes en este segmento son: Zoolnasm, Transimage, BYD (con Huaihai), SVOLT, Li-Fun.
- **Sustitución de baterías de plomo-ácido** en sistemas de arranque, UPS, telecomunicaciones y microhíbridos de 48 V (Zoolnasm, Zenergy, Great Power).

Desafíos principales:

- **Coste vs. litio**: La caída del precio del litio en 2024-2025 reduce la ventaja económica del sodio en el corto plazo. Sin embargo, el sodio sigue siendo más estable en precio por su abundancia.
- **Escalado industrial**: Muchas empresas aún están en fase piloto o con producción limitada. **CATL, HiNa y Transimage** han alcanzado producción masiva.
- **Normativas y estandarización**: China lidera en regulación, con estándares nacionales publicados en 2023. Otros mercados aún carecen de normativa.

Tendencias futuras:

- **Hibridación Li-Na**: que combina coste bajo y VE con autonomía aceptable.
- **Mayor sostenibilidad**: materiales abundantes y reciclables, sin Co, Ni o Li.
- **Diversificación de productos**: crecimiento hacia: baterías de estado sólido (NEG), sistemas integrados con energías renovables (Sungrow, Zenergy) o baterías ultrarrápidas para movilidad y herramientas (Tiamat, CATL).
- **Expansión fuera de China**: se espera un crecimiento significativo en India, Europa y América Latina en almacenamiento estacionario y movilidad ligera.

¹ Aunque se han analizado muchas de ellas, se han encontrado algunas más, como es el caso de las siguientes: Jiangsu Chuanyi Technology Co., Ltd.; STAR SODIUM; Sunwoda; Pylontech; BenAn Energy; Huayang Group; Shengyang; Tongxing environmental protection technology joint stock company; Veken Technology; Do-Fluoride New Materials; JNERGY; Puna Energy.

2. Definición de modelos y su utilidad dentro de su aplicación industrial

Dentro del ámbito del almacenamiento de energía, y más específicamente en el campo del almacenamiento electroquímico basado en baterías (Battery Energy Storage System, BESS), los modelos de simulación tienen una importancia clave tanto en el diseño y dimensionado de los BESS como en su integración y operación.

Por una parte, los modelos de simulación permiten dimensionar en potencia y energía el BESS en función de la aplicación y del perfil esperado de operación, calculando las necesidades técnicas para evitar sobredimensionar el sistema o, peor aún, subdimensionarlo y no cumplir con los requisitos de la aplicación.

Además, los modelos permiten estimar el envejecimiento del BESS asociado a dicho perfil, lo que permite calcular la duración esperada del equipo. El envejecimiento de un BESS está íntimamente relacionado con el coste del proyecto, ya que el BESS debe ser reemplazado cuando no mantenga las exigencias técnicas de la aplicación.

Típicamente, los modelos de simulación de baterías también estiman la evolución y distribución de la temperatura dentro del sistema, permitiendo así identificar los límites de operación y evitar posibles fallos de seguridad derivados de un sobrecalentamiento del BESS.

Los modelos tienen, además, un papel importante en el diseño e implementación de sistemas de control o de gestión energética (Energy Management Systems, EMSs). Realizar estudios preliminares de estos sistemas en simulación permite analizar la evolución dinámica y térmica del BESS, de forma que se garantice una operación estable a lo largo del tiempo.

Asimismo, los modelos son fundamentales para el diagnóstico y pronóstico del BESS una vez integrado y en operación, tanto para la estimación de la capacidad de la batería en tiempo real como para la evaluación de su estado de salud. El estado de carga (State of Charge, SoC) no puede medirse de forma fiable a partir de las variables de operación de la batería (tensión, corriente o temperatura), sino que debe ser estimado mediante modelos durante los procesos de carga y descarga, y corregido en función del nivel de tensión.

Algo similar ocurre con el estado de salud (State of Health, SoH), cuya estimación fiable requiere modelos que utilicen los datos históricos de funcionamiento del BESS para evaluar la pérdida de capacidad, contrastando la estimación con la evolución de las variables internas del sistema.

Por ello, en aplicaciones industriales, el uso de modelos de simulación tanto en las etapas de diseño y dimensionado como en las de integración y operación es fundamental para optimizar el coste, la seguridad y la durabilidad del sistema, así como para permitir un diagnóstico y pronóstico adecuados.

2.1. Arquitecturas de modelos representativos y justificación de su uso en aplicaciones industriales

Dentro de los diferentes enfoques y arquitecturas con las que se construyen los modelos de simulación para BESS, destacan las siguientes familias:

- Modelos electroquímicos (fisicomatemáticos)
- Modelos semiempíricos (circuito equivalente)
- Modelos basados en datos (data-driven, redes neuronales o machine learning)

2.1.1. Modelos electroquímicos

Los modelos electroquímicos se fundamentan en la descripción detallada de los fenómenos físicos y químicos que ocurren en el interior de la celda, incluyendo efectos como el transporte de carga, la difusión de iones, las reacciones en cada uno de los electrodos, la dinámica térmica de las reacciones, así como la influencia del separador y los colectores de corriente, entre otros. Ejemplos clásicos de este tipo de modelos aplicados a BESS son los modelos basados en ecuaciones diferenciales acopladas, como las ecuaciones de Newman, o sus simplificaciones, como el Single Particle Model.

Este tipo de modelos ofrece una altísima precisión y permite estudiar en detalle la influencia de los parámetros internos del sistema, resultando especialmente útiles en el diseño de nuevas celdas y químicas. Sin embargo, presentan una elevada complejidad, tanto por el número de parámetros necesarios para su caracterización como por la dificultad de acceso a dicha información, que habitualmente solo está disponible para los propios fabricantes de celdas. Además, la naturaleza matemática de las ecuaciones que los conforman implica un coste computacional muy elevado, lo que limita su uso en aplicaciones industriales que requieren simulación en tiempo real o integración en sistemas embebidos.

2.1.1. Modelos semiempíricos

Los modelos semiempíricos parten de una estructura física simplificada, incorporando parámetros que pueden obtenerse mediante ensayos experimentales de operación. Típicamente, este tipo de modelos se basan en modelos de circuito equivalente, los cuales representan el comportamiento dinámico de la batería mediante redes de elementos eléctricos (resistencias, condensadores, bobinas, fuentes de tensión, etc.).

Estos modelos permiten reproducir con buena precisión la respuesta dinámica del BESS (a nivel de celda, módulo o pack), incluyendo fenómenos como la caída de tensión óhmica, la polarización transitoria y, típicamente, los efectos térmicos o de envejecimiento. Gracias a su estructura simplificada, pueden integrarse fácilmente y utilizarse en una amplia variedad de aplicaciones industriales, ya que combinan un bajo coste computacional con una precisión adecuada para tareas de control, estimación o simulación de la operación.

2.1.3. Modelos basados en datos

Los modelos basados en datos utilizan técnicas de aprendizaje automático, como redes neuronales, algoritmos de lógica difusa, métodos de machine learning o regresión avanzada, para capturar el comportamiento de la batería a partir de grandes volúmenes de datos de operación. Tienen especial relevancia en entornos donde se dispone de datos históricos representativos del funcionamiento real del BESS bajo condiciones similares a las de la aplicación objetivo. En estos casos, pueden alcanzar una precisión muy elevada, especialmente en tareas de estimación y predicción como el cálculo del SoC, SoH o la vida útil restante (Remaining Useful Life, RUL).

No obstante, este tipo de modelos requiere pasar por un proceso de entrenamiento robusto y validado, y presenta una limitación importante en términos de interpretabilidad física, ya que no existe una relación explícita entre las variables internas del modelo y los fenómenos físicos que gobiernan el funcionamiento de la batería.

2.1.4. Evaluación comparativa

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los tres diferentes enfoques a la hora de desarrollar modelos de simulación para representar el comportamiento de un BESS.

| Criterio | Electroquímicos | Semiempíricos | Basados en datos |
|------------------------------|-----------------|---------------|------------------|
| Precisión | Muy alta | Media-alta | Alta |
| Coste computacional | Alto | Bajo | Medio |
| Facilidad de caracterización | Baja | Alta | Media |
| Interpretabilidad física | Alta | Media | Baja |
| Aplicabilidad industrial | Limitada | Alta | Media |

Tabla 6. Comparativa de las diferentes arquitecturas de modelos.

En base a la tabla y a lo expuesto en los subapartados anteriores, los modelos semiempíricos se presentan como la alternativa más adecuada desde el punto de vista industrial, dado el equilibrio que ofrecen entre precisión, coste computacional, facilidad de caracterización e interpretabilidad física. Por ello, la siguiente sección recoge los principales modelos semiempíricos desarrollados en la literatura científica para BESS de Na-ion.

2.2. Revisión de modelos semiempíricos en la literatura: dinámicos, térmicos y de envejecimiento

Es común que los modelos semiempíricos de BESS se estructuren en varios submodelos diferenciados, cada uno de los cuales representa un comportamiento específico del sistema:

- Submodelo dinámico, encargado de reproducir la evolución de la tensión y el SoC en función del perfil de corriente o de potencia aplicado.

- Submodelo térmico, que describe la generación y disipación de calor dentro del BESS en relación con las condiciones de operación.
- Submodelo de envejecimiento, orientado a estimar la pérdida de capacidad y de potencia del BESS tanto en función de las variables de funcionamiento (envejecimiento por ciclado) como del paso del tiempo (envejecimiento estacionario).

En modelos semiempíricos de mayor complejidad, es habitual que los parámetros del submodelo dinámico sean dependientes de las variables de los submodelos térmico y de envejecimiento, de modo que la evolución de la tensión y del SoC se vea influida por la temperatura y por la degradación del BESS.

A fecha de redacción de este informe, los modelos semiempíricos de BESS para Na-ion más relevantes en la literatura son los siguientes:

El trabajo publicado en [55] desarrolla un modelo basado en el circuito equivalente de la Figura 3, ampliamente utilizado para representar el comportamiento de BESS, en el que la precisión y la facilidad de caracterización dependen del número de ramas RC que se incluyan en paralelo:

- R_0 recoge las pérdidas óhmicas globales de la celda.
- Las resistencias de las ramas RC representan las resistencias de polarización ligadas a la transferencia de carga y a los fenómenos de transporte en la interfase electrodo-electrolito.
- Los condensadores de las ramas RC representan la capacidad asociada al almacenamiento de carga, que se vincula con la respuesta retardada de la difusión iónica en los electrodos.

Los autores comparan distintas configuraciones y validan el modelo frente a resultados experimentales de celdas de Na-ion. A medida que aumenta el número de ramas, mejora la capacidad del modelo para reproducir fenómenos dinámicos.

La caracterización se realiza mediante ensayos de carga y descarga a diferentes corrientes, y la validación con perfiles de funcionamiento realistas. Los errores obtenidos se mantienen por debajo del 1 % en las condiciones de prueba. El modelo consigue un ajuste preciso a pesar de su sencillez y del reducido número de parámetros, aunque no contempla la dependencia de estos con la temperatura ni con el envejecimiento.

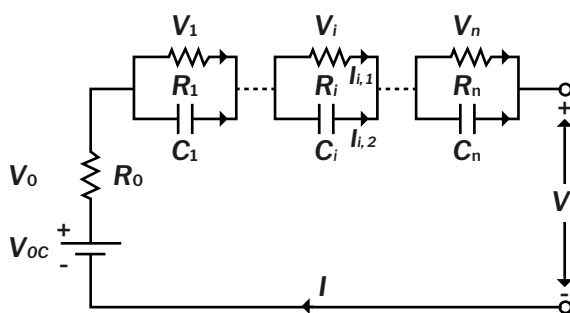


Figura 3. Diagrama del circuito equivalente utilizado en Yi-Feng et al. (2021).

Por otro lado, el trabajo [56] propone un modelo de circuito equivalente como el que se muestra en la Figura 4, cuyo submodelo dinámico incorpora cuatro elementos diferenciados que representan los fenómenos internos de un BESS de Na-ion:

- SEV (Surface Equilibrium Voltage): representa la tensión de equilibrio superficial, modelada como un desplazamiento de la curva OCV para recoger los efectos de difusión sólida del sodio en los electrodos.
- V_s : caída de tensión asociada a la resistencia serie de los componentes de la celda.
- V_{surf} : caída de tensión debida a fenómenos en la superficie de los electrodos, como la transferencia de carga y la resistencia de la capa de interfaz de electrolito sólido (Solid Electrolyte Interface, SEI).
- V_{ld} : contribución asociada a la difusión de iones de sodio en el electrolito.

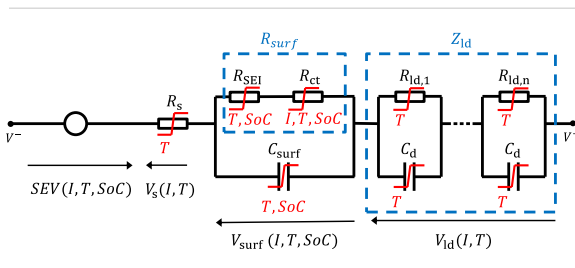


Figura 4. Diagrama del circuito equivalente utilizado en Rabab et al. (2023).

El modelo se valida mediante ensayos de carga y descarga a distintas corrientes y temperaturas, alcanzando errores inferiores al 3 % en las condiciones más exigentes. Aunque no se desarrolla un submodelo térmico, se introduce la dependencia térmica de los parámetros dinámicos, permitiendo extender la validez del modelo a condiciones alejadas del punto óptimo. No se incluye dependencia explícita de los parámetros con el SoH ni un submodelo de envejecimiento.

En la publicación [57] se propone el circuito equivalente de la Figura 5, en el que las ramas RC se sustituyen por elementos en frecuencia, capaces de representar con mayor fidelidad los procesos internos de un BESS de Na-ion en un mayor rango de temperaturas. El modelo incluye los siguientes parámetros:

- R_0 representa la resistencia óhmica interna de la celda.
- R_p recoge la resistencia de polarización vinculada a la transferencia de carga en los electrodos.
- La impedancia de fase constante sustituye a las capacidades clásicas y refleja la naturaleza no ideal de los procesos de acumulación de carga en los electrodos.
- El componente Warburg modela la difusión del sodio a bajas frecuencias.

El modelo propuesto se valida con diferentes perfiles de funcionamiento y con varias temperaturas, consiguiendo errores relativos menores al 1 % para 25°C. Aunque no se desarrolla un submodelo térmico explícito, se introduce la dependencia de los parámetros con la temperatura. En cuanto al envejecimiento, se comparan celdas nuevas y degradadas, incorporando la variación de parámetros con el SoH, pero sin un submodelo específico que describa la evolución temporal de la degradación.

A partir de la literatura revisada, se observa que los modelos de circuito equivalente, tanto los clásicos con ramas RC como los formulados en frecuencia, son adecuados para representar el comportamiento dinámico de los BESS de Na-ion con buena precisión y un número reducido de parámetros. Esto los hace útiles para dimensionar e integrar estos sistemas en aplicaciones reales.

Por el contrario, los submodelos térmicos y de envejecimiento no están desarrollados en ninguno de los trabajos analizados. En el mejor de los casos, la temperatura se introduce como una variable que modifica los parámetros del modelo dinámico, pero no se modela el balance térmico ni su efecto acumulado. Del mismo modo, aunque algunos autores consideran celdas degradadas, no se plantea una formulación explícita que permita estimar la evolución del sistema con el paso del tiempo.

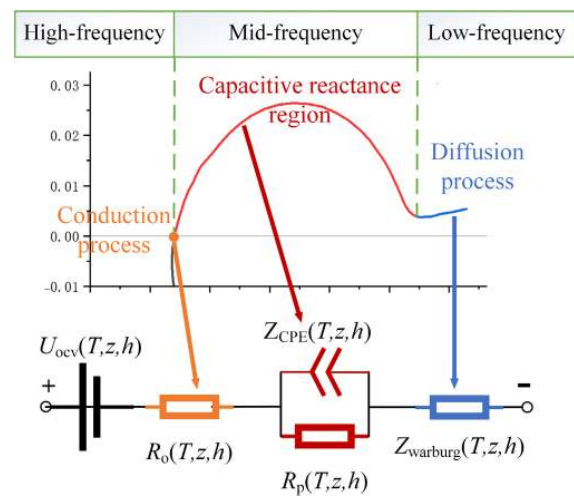


Figura 5. Diagrama del circuito equivalente utilizado en Jiang et al. (2025).

Ambos aspectos son críticos en entornos industriales, ya que afectan directamente a las necesidades de refrigeración, al diseño del sistema, a la vida útil del equipo y, en última instancia, al coste global de la instalación. Su ausencia limita la aplicabilidad real de los modelos actuales y representa una línea de trabajo abierta para su uso en proyectos industriales. Para desarrollar el submodelo térmico, debería acoplarse el comportamiento eléctrico del modelo dinámico con la generación de calor dentro de la celda, relacionándolo con las pérdidas óhmicas y de polarización. Del mismo modo, se necesita establecer la parte de evacuación de calor tanto por conducción dentro de la celda como por convección al ambiente. El submodelo debería parametrizarse mediante ensayos controlados en cámara climática y diferentes perfiles de potencia, que permitan capturar la evolución de la temperatura en función de la corriente, el SoC y las condiciones ambientales.

En paralelo, el desarrollo de un submodelo de envejecimiento exige definir métricas que recojan la pérdida de capacidad y el aumento de resistencia interna, tanto en condiciones estacionarias como bajo ciclado. Su parametrización se basaría en campañas de ensayos prolongadas, en las que se monitoriza la degradación bajo distintos regímenes de operación.

3. Metodología de caracterización dinámica, térmica y de envejecimiento de baterías de sodio-ion

La caracterización experimental es un paso fundamental en cualquier sistema de almacenamiento basado en BESS, ya que permite conocer el comportamiento real del dispositivo en distintas condiciones de operación. En el caso del Na-ion, donde todavía existe una alta variabilidad entre fabricantes, formatos y químicas, la caracterización cobra especial importancia para poder evaluar prestaciones, ajustar modelos o tomar decisiones a la hora de integrarlas en alguna aplicación.

Para asegurar que los datos obtenidos sean útiles y comparables, la caracterización debe realizarse siguiendo protocolos estandarizados. En este sentido, resulta imprescindible apoyarse en normativas técnicas que definan condiciones de ensayo e indicadores de rendimiento. A fecha de redacción de este informe, no existe una normativa internacional específica para BESS de Na-ion en materia de caracterización.

Las normas “IEC 62984-3:2020 [58]. High-temperature secondary batteries – Part 3: Sodium-based batteries – Performance requirements and tests” cubren tecnologías de sodio de alta temperatura (Na-S y Na-NiCl₂), pero no son válidas para Na-ion.

Sin embargo, dada la similitud de funcionamiento entre BESS de Li-ion y Na-ion, es posible emplear como referencia las normativas ya existentes para litio, utilizando sus protocolos validados y adaptando los parámetros de los ensayos a las particularidades del sodio.

Normas como la “IEC 62660-1:2018 [59]. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles — Part 1: Performance testing” o la “ISO 12405-4:2018 [60]. Electrically-propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 4: Performance testing”, desarrolladas originalmente para BESS de Li-ion, pueden servir como referencia hasta que existan normas específicas para BESS de Na-ion.

Aplicar estas normas permite obtener resultados reproducibles, trazables y consistentes, que pueden utilizarse posteriormente para el desarrollo de modelos o la validación de sistemas. Además, facilita la comunicación entre fabricantes, integradores y operadores.

De manera habitual, las normativas recogen ensayos de rendimiento en condiciones estándar, y sería deseable que incluyesen también caracterizaciones más representativas del uso real de los sistemas de almacenamiento en aplicaciones con perfiles variables.

Contar con este tipo de ensayos normalizados permitiría una caracterización más completa y útil, especialmente en el contexto del desarrollo de modelos semiempíricos aplicables en entornos industriales.

3.1. Adaptación de metodologías de caracterización aplicadas a baterías de ion-litio

Dentro del Li-ion, las normativas estandarizadas más utilizadas y los ensayos más relevantes dentro de cada una son los siguientes:

- *IEC 62660-1:2018 [59]. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles — Part 1: Performance testing*: establece los métodos de ensayo para la evaluación de celdas de Li-ion destinadas a aplicaciones de automoción. Su objetivo es determinar el rendimiento eléctrico de la celda en distintas condiciones de operación.
- *ISO 12405-4:2018 [60]. Electrically-propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 4: Performance testing*: especifica los procedimientos de ensayo para sistemas y packs de baterías de ion-litio en aplicaciones de tracción eléctrica. Abarca sistemas de alta energía y de alta potencia. Su alcance es más amplio que el de la IEC 62660-1, ya que se centra en el comportamiento del conjunto del BESS bajo condiciones de uso representativas.
- *SAE J1798:2019-11 [61]. Performance and Life Test Procedures for Electric Vehicle Battery Modules*: define los procedimientos de ensayo para módulos de baterías recargables de vehículos eléctricos, con énfasis en la caracterización de rendimiento y la determinación de la vida útil.

Los **ensayos más relevantes** recogidos dentro de estas normas son los siguientes:

- Capacidad (Ah):
 - Descargar la celda hasta la tensión mínima especificada por el fabricante.
 - Cargarla de nuevo hasta la tensión máxima indicada (según protocolo CC - CV o el definido por el fabricante).
 - Tras reposo térmico (≈ 12 h o hasta estabilización), descargar a corriente constante (C/3 en BEV, 1C en HEV) hasta la tensión mínima.
 - La capacidad se obtiene multiplicando la corriente por el tiempo de descarga.
- Energía (Wh):
 - Medir la capacidad se indica arriba.
 - Calcular la tensión media durante la descarga (integración de $V \cdot dt$).
 - Multiplicar la capacidad por la tensión media para obtener la energía.
 - Expresarla como densidad gravimétrica (Wh/kg) y volumétrica (Wh/L).

- Potencia (W, W/kg, W/L):
 - Ajustar SoC (20 %, 50 %, 80 %) y temperatura (-20°C, 0°C, 25°C, 40°C).
 - Aplicar un pulso de descarga de 10 s a la corriente máxima definida por el fabricante (I_{dmax}).
 - Calcular potencia instantánea como $P_d = U_d \cdot I_{dmax}$, siendo U_d la tensión al final del pulso.
 - Para potencia regenerativa, aplicar un pulso de carga de 10 s a I_{cmax} y calcular $P_c = U_c \cdot I_{cmax}$.
- Respuesta dinámica (HPPC / Dynamic Stress Test):
 - Descarga escalonada en intervalos de SoC (p. ej. 10 %), intercalando pulsos de alta corriente de 10-30 s en carga y descarga.
 - Determinar resistencia aparente y potencia disponible en cada SoC y T^a .
 - Repetir a varias temperaturas (-20°C, 0°C, 25°C, 40°C).
- Retención de carga (Charge Retention):
 - Cargar la celda al 100 % (BEV) o al 50 % (HEV).
 - Almacenar en circuito abierto durante periodos definidos (2, 14, 30 días en SAE; 28 días a 45°C en IEC).
 - Descargar y medir la capacidad retenida frente a la inicial.
- Vida útil estacionaria (calendar aging):
 - Almacenar celdas a SoC definidos (20-50-100 %) y T^a elevadas (p. ej. 45°C).
 - Extraer periódicamente para medir capacidad y resistencia interna.
 - Reportar pérdida de capacidad (%) frente al valor inicial.
- Vida útil por ciclado (Cycle life):
 - Cargar/descargar con perfiles dinámicos (BEV: perfiles de conducción; HEV: perfiles con regeneración) a temperaturas definidas (25-45°C).
 - Medir capacidad y potencia cada cierto número de ciclos o cada 28 días.
 - El ensayo termina al perder un 20 % de capacidad inicial o superar límite de resistencia.
- Eficiencia energética (Coulómbica y global):
 - Ejecutar ciclos de carga y descarga completos con corrientes definidas (CC-CV carga, CC descarga).
 - Calcular eficiencia coulómbica ($A_{hdescargados}/A_{hcargados}$) y eficiencia energética ($Wh_{descargados}/Wh_{cargados}$).

En el caso de las BESS de Na-ion, la aplicación de estas metodologías requiere algunos ajustes respecto a Li-ion. En primer lugar, la ventana de tensión operativa es diferente (típicamente en torno a 1,5-3,8 V por celda), lo que condiciona tanto la determinación de capacidad y energía como la definición de los límites de corte en los ensayos. Además, los ensayos de referencia deberían realizarse con tasas de corriente más moderadas (0,2-0,5 C) para reflejar de forma realista la potencia específica de estas químicas. También es necesario considerar tiempos de reposo más largos en los ensayos de OCV y entre pulsos, debido a la mayor histéresis y a procesos difusivos más lentos que en Li-ion.

3.2. Equipamiento de laboratorio y protocolos de ensayo requeridos

Para poder realizar los ensayos mencionados en el apartado anterior y caracterizar baterías de Na-ion, es necesario un conjunto de equipos que permitan controlar las condiciones de operación y registrar de manera fiable las variables críticas.

El equipamiento necesario podría incluir los siguientes elementos:

- Cámaras climáticas para someter las celdas y módulos a rangos de temperatura definidos y reproducibles.
- Fuentes bidireccionales de potencia programables con distintos rangos de tensión y corriente, que permiten ensayar desde celdas individuales hasta módulos completos, realizando ciclos de carga y descarga controlados.
- Instrumentación de medida (sensores de temperatura de superficie y ambiente, adquisición de tensión y corriente a alta resolución) para evaluar el comportamiento térmico y eléctrico en tiempo real.
- Sistemas de seguridad y protección que incluyen fusibles, contactores y protecciones frente a sobrecorriente y sobretensión, necesarios para realizar los ensayos de manera segura.
- Plataformas de control y adquisición de datos que integran la programación de los perfiles de ensayo y la monitorización de las variables de interés, permitiendo automatizar secuencias complejas y almacenar resultados de forma estructurada.

A esto se suma la necesidad de contar con un conjunto suficiente de celdas de prueba, que permitan repetir los ensayos bajo condiciones idénticas.

La Unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT dispone de todo este equipamiento, así como de una bancada multifuncional que permite la conexión y ensayo de prototipos de hasta 1000 V. Esto facilita realizar caracterizaciones tanto a nivel de celda y módulo como en desarrollos de mayor escala, siempre bajo condiciones controladas y reproducibles.



Figura 6. Rack de fuentes bidireccionales del laboratorio de la unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT.



Figura 7. Cámara climática del laboratorio de la unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT.



Figura 8. Laboratorio de la unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT, con el equipamiento necesario para la realización de ensayos de caracterización.

4. Conclusiones y retos tecnológicos y comerciales de las baterías de ion sodio para sustituir a las baterías de ion litio

El principal reto tecnológico que presenta el desarrollo de las baterías de sodio hoy en día es su menor densidad energética en comparación con las tecnologías de litio.

Esto determina enormemente las aplicaciones para las cuales es susceptible de ser utilizada este tipo de batería.

No obstante, las baterías de ion sodio pueden constituir una alternativa emergente a las de litio en algunos casos en los que el compromiso entre la densidad energética, la seguridad y el coste le sean favorable.

El menor riesgo de desbordamiento térmico y el menor coste de materiales le pueden hacer muy competitivo, sobre todo, en aplicaciones descentralizadas.

Por otro lado, desde el punto de vista comercial, el reto es el desarrollo de fábricas que desarrollen este producto a gran escala, asegurando un coste competitivo, de la misma forma que ocurrió con las tecnologías de litio.

Actualmente sólo hay algunas fábricas en fase de piloto y en manos de unas pocas empresas.

¿Qué podemos aportar para mejorar el grado de desarrollo de este tipo de baterías?

Propuestas para el próximo año:

1. Desarrollo de ensayos de celdas de ion sodio destinados a la **obtención de un modelo de batería de sodio ion** que permita estudiar la utilización de este tipo de baterías en aplicaciones relacionadas con energías renovables, y en concreto con energía solar fotovoltaica. El modelo permitirá definir, determinar cuáles son los elementos con los que tiene que trabajar la batería (BMS necesario, sistema de refrigeración, convertidor electrónico de potencia, etc.), así como poder realizar un dimensionado preciso y optimizado de un sistema de almacenamiento de energía basado en batería de ion sodio que garantice una mayor viabilidad económica de la instalación completa.
2. Como se ha comentado en el punto 3, la Unidad de Accionamientos Eléctricos del CIEMAT dispone del equipamiento para realizar **caracterización de baterías de sodio-ion** tanto a nivel de celda y módulo como en desarrollos de mayor escala, siempre bajo condiciones controladas y reproducibles.

Una bancada multifuncional permitirá la conexión y ensayo de prototipos de baterías de sodio ion de hasta 1000 V que reproduzcan situaciones de generación solar fotovoltaica realistas, así como de distintos tipos de carga o redes eléctricas a las que se conecte, y que permitirán la **validación del uso de este tipo de baterías de sodio-ion en entornos realistas**.

Referencias

- [1] *Sodium-ion battery disadvantage (Motawill Battery)*, 2024. [Online]. Available: <https://www.motawillbattery.com/sodium-ion-battery-disadvantage/>
- [2] F. M. I. Inc., *“Energy Storage Sodium Ion Battery Market Size and Share Forecast Outlook 2025 to 2035”*, Sep. 2025. [Online]. Available: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/energy-storage-sodium-ion-battery-market>
- [3] M. Intelligence, *“Sodium ion Battery Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030)”*, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/sodium-ion-battery-market>
- [4] International Energy Agency (IEA), *“Outlook for battery and energy demand (Global EV Outlook 2024)”*, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-battery-and-energy-demand>
- [5] BloombergNEF, *“Global Energy Storage Market Records Biggest Jump Yet”*, Apr. 2024, [Online]. Available: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-energy-storage-market-records-biggest-jump-yet>
- [6] G. M. Insights, *“Energy Storage Sodium Ion Battery Market. Global Forecast (2025-2034)”*, May 2025. [Online]. Available: <https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/energy-storage-sodium-ion-battery-market>
- [7] *“Altris starts large-scale production of sustainable battery material”*, 2022. [Online]. Available: <https://www.uu.se/en/department/chemistry-angstrom-laboratory/news/archive/2022-05-16-altris-starts-large-scale-production-of-sustainable-battery-material>
- [8] *“Altris reaches new milestone with 160 Wh/kg battery cell”*, 2024. [Online]. Available: <https://www.altris.se/news/altris-reaches-new-milestone-with-160-wh-kg-battery-cell>
- [9] *“European sodium-ion battery cells now a reality”*, 2025. [Online]. Available: <https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2025/6/european-sodium-ion-battery-cells-now-a-reality>
- [10] *“Altris secures 150 MSEK series B1 funding”*, 2024. [Online]. Available: <https://www.eit.europa.eu/news-events/news/altris-secures-150-msek-series-b1-funding>
- [11] *“BYD & Huaihai launch joint venture for sodium-ion batteries”*, 2024. [Online]. Available: <https://www.electrive.com/2024/05/13/byd-huaihai-launch-joint-venture-for-sodium-ion-batteries/>
- [12] *“CATL Company News 2024B”*, 2024. [Online]. Available: <https://www.catl.com/en/news/6401.html>
- [13] *“CATL Company News 2024A”*, 2024. [Online]. Available: <https://www.catl.com/en/news/6015.html>
- [14] *“Chinese battery maker CATL launches second-generation fast charging battery”*, 2025. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/technology/chinese-battery-maker-catl-launches-second-generation-fast-charging-battery-2025-04-21>
- [15] *“Faradion world leader sodium-ion battery technology announces collaboration licensing deal AMTE Power”*, 2024. [Online]. Available: <https://batteriesnews.com/faradion-world-leader-sodium-ion-battery-technology-announces-collaboration-licensing-deal-amte-power>
- [16] *“First Faradion battery installed in Australia”*, 2024. [Online]. Available: <https://faradion.co.uk/first-faradion-battery-installed-in-australia>
- [17] *“World-first’ grid-scale sodium-ion battery project in China enters commercial operation. Energy-Storage.news”*, 2024. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/world-first-grid-scale-sodium-ion-battery-project-in-china-enters-commercial-operation/>
- [18] *“Great Power Passed the First Batch of Sodium-ion Battery ... Great Power”*, 2023. [Online]. Available: <https://www.greatpower.net/en/news/46.html>
- [19] *“WORLD-CLASS BATTERY MANUFACTURER – Great Power. Great Power.”*, 2023. [Online]. Available: <https://www.greatpower.net/vancheerfile/files/2023/11/20231122154030808.pdf>
- [20] *“World’s largest sodium-ion battery goes into operation – ESS News”*, 2024. [Online]. Available: <https://www.ess-news.com/2024/07/02/worlds-largest-sodium-ion-battery-goes-into-operation/>
- [21] *“Hina Battery (company website)”*, 2024. [Online]. Available: <http://www.hinabattery.com/en/>
- [22] *“Hina (product page)”*, 2024. [Online]. Available: <https://es.zkhina.com/product-category/sodium-ion-battery/.html>
- [23] *“Hina presents sodium-ion battery solution for commercial vehicles”*, 2025. [Online]. Available: <https://battery-news.de/en/2025/04/03/hina-presents-sodium-ion-battery-solution-for-commercial-vehicles>

- [24] “Lifuntech (company website)”, 2024. [Online]. Available: <http://cts.businesswire.com/ct/CTPid=smartlink&url=http%3A%2F%2Fwww.lifuntech.com&sheet=51578983&newsitemid=20170622005764&lan=en-US&anchor=www.lifuntech.com&index=1&md5=466f55c971be41a8a185e73a18308672>
- [25] “Natrium Energy Signed a Contract of 80,000 mt of Sodium-Ion Battery Cathode Material Project, Further Accelerating the Industrialisation”, 2023. [Online]. Available: <https://news.metal.com/newscontent/101860656/natrium-energy-signed-a-contract-of-80000-mt-of-sodium-ion-battery-cathode-material-project-further-accelerating-the-industrialisation/>
- [26] Q. Li and others, “Elevating the Practical Application of Sodium-Ion Batteries through Advanced Characterization Studies on Cathodes”, *Energies* (Basel), vol. 16, 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/24/8004>
- [27] “浙里好成果——钠创新能源年产四万吨钠离子电池正极材料”, 2023. [Online]. Available: https://www.sohu.com/a/812755480_121117477
- [28] “浙江钠创新能源有限公司官方网站”, 2024. [Online]. Available: <http://www.natrium-energy.cn/>
- [29] “China Establishes First Sodium Battery Standard: Highstar Achieves Certification”, 2025. [Online]. Available: <https://sodiumbatteryhub.com/2025/04/29/china-est-ablishes-first-sodium-battery-standard-highstar-achieves-certification/>
- [30] “DG-Matrix and Natron Energy Announce Strategic Partnership for EV Fast Charger Solutions”, 2023. [Online]. Available: <https://www.businesswire.com/news/home/20231205306360/en/DG-Matrix-and-Natron-Energy-Announce-Strategic-Partnership-for-EV-Fast-Charger-Solutions>
- [31] “Development of the World’s First All-Oxide All-Solid-State Sodium (Na) Ion Secondary Battery”, 2021. [Online]. Available: <https://www.neg.co.jp/en/news/20211118-5221.html>
- [32] “Started Shipping Samples of Heat-Resistant All-Solid-State Sodium-Ion Secondary Batteries”, 2024. [Online]. Available: https://www.neg.co.jp/en/news/news_20240821.html
- [33] “Battery Cells for EV & Energy Storage Solutions”, 2024. [Online]. Available: <https://www.reptbattero.com/battery-cell/>
- [34] “瑞浦兰钧获钠离子电池专利，揭示未来电池市场新趋势！技术_领域...”, 2024. [Online]. Available: https://www.sohu.com/a/869506275_122066678
- [35] “锂电产业链周记 | 零跑汽车、中创新航成立合资公司 宁德时代股价重返300元上方 | 界面新闻”, 2024. [Online]. Available: <https://m.jiemian.com/article/13267577.html>
- [36] “SunGrow commences construction of its first battery manufacturing base in China - Rho Motion”, 2024. [Online]. Available: <https://rhomotion.com/news/sungrow-commences-construction-of-its-first-battery-manufacturing-base-in-china/>
- [37] “SunGrow’s Brazilian business is heating up for batteries as solar project demand cools - Energy Storage”, 2025. [Online]. Available: <https://www.ess-news.com/2025/09/02/sungrows-brazilian-business-is-heating-up-for-batteries-as-solar-project-demand-cools/>
- [38] “SVOLT Energy Technology Initiates Sodium-Ion Battery Anode Material Project”, 2023. [Online]. Available: <https://news.metal.com/newscontent/103228262/SVOLT-Energy-Technology-Initiates-Sodium-Ion-Battery-Anode-Material-Project>
- [39] “CATL, SVOLT Energy Technology, REPT Battero, Great Power Energy, Ganfeng LiEnergy, Highstar, and other battery cell enterprises gathered in Suzhou. - Shanghai Metal Market”, 2024. [Online]. Available: <https://www.metal.com/en/newscontent/103255824>
- [40] “Tiamat Energy (company profile)”, 2024. [Online]. Available: <https://battery-tech.net/company/tiamat-energy>
- [41] “Tiamat secures funding for production of sodium-ion batteries”, 2024. [Online]. Available: <https://battery-news.de/en/2024/01/16/tiamat-secure-s-funding-for-production-of-sodium-ion-batteries>
- [42] “Endeavour announces strategic partnership in ultra-fast Tiamat battery technology”, 2024. [Online]. Available: <https://www.endeavourii.com/post/endeavour-announces-strategic-partnership-in-ultra-fast-tiamat-battery-technology>
- [43] “Chinese tech firm Transimage secures order for sodium-ion batteries from German automaker - CnEVPost”, 2023. [Online]. Available: <https://cnevpost.com/2023/07/24/transimage-secures-order-for-sodium-ion-batteries-german-automaker/>
- [44] “Batería de iones de sodio 18650 3,05 V”, 2024. [Online]. Available: <https://www.pkenergy.com/es/18650-3-05v-sodium-ion-battery-product/>
- [45] “3.1V 210Ah Sodium Ion Battery | Battery Energy Storage System”, 2024. [Online]. Available: <https://www.battery-energy-storage-system.com/lifepo4-battery/transimage-sodium-ion-battery.html>
- [46] “Transimage Technology Co., Ltd. established the Sodium-ion ...”, 2024. [Online]. Available: <https://www.transimage.cn/?m=home&c=Lists&a=index&tid=52&lang=en>

- [47] “ZONERGY, PIONEER IN SODIUM-ION BATTERY DEVELOPMENT – Solar Energy System – Solar Energy Equipment Supplier”, 2024. [Online]. Available: <https://www.zonergy.com/zonergy-pioneer-in-sodium-ion-battery-development/>
- [48] “产品英文单页”, 2024. [Online]. Available: https://cn.zonergy.com/zxny/content_file/nxzzq/Apollo%E7%B3%BB%E5%88%97/2024/3/e8160b1f45d04f0682785f9fa716b625.pdf
- [49] “Top 10 sodium battery manufacturers in China”, 2024. [Online]. Available: <https://batteryswapcabinet.com/top-10-sodium-battery-manufacturers-in-china/>
- [50] “爱玛、新日电动车钠电车型亮相：48V 24Ah 聚钠1号电池 599元”, 2024. [Online]. Available: <https://www.donews.com/news/detail/4/4136202.html>
- [51] “Chinese sodium battery maker Zoolnasm says it becomes supplier to one global auto parts firm”, 2024. [Online]. Available: <https://cnevpost.com/2024/11/01/zoolnasm-become-s-sodium-battery-supplier-global-auto-parts-firm/>
- [52] “众钠能源发布全球首款高倍率硫酸铁钠钠离子电芯：50Ah，10C放电”，2024. [Online]. Available: <https://www.i-newcar.com/index.php?m=home&c=View&a=index&aid=1568>
- [53] “ZOOLNASM’s High-Rate Sodium Ion Battery: Breakthrough in Energy Density”, 2024. [Online]. Available: <https://www.evliithium.com/lifepo4-battery-news/zoolnasm-high-rate-sodium-ion-battery.html>
- [54] “众钠能源聚钠1号率先通过《电动自行车用钠离子蓄电池》团标测试”，2024. [Online]. Available: <https://www.aibangsib.com/a/6039>
- [55] Y.-F. Feng and others, “Equivalent circuit modeling of sodium-ion batteries”, *J Energy Storage*, vol. 43, p. 103233, 2021.
- [56] H. Rabab and others, “Equivalent circuit model for sodium-ion batteries with physical-based representations of their non-linearities”, in *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, 2023.
- [57] C. Jiang and others, “Fractional-order equivalent circuit model for commercial sodium-ion batteries in a wide temperature range considering aging”, *J Energy Storage*, vol. 105, p. 114552, 2025.
- [58] International Electrotechnical Commission, “IEC 62984-3:2020. High-temperature secondary batteries – Part 3: Sodium-based batteries – Performance requirements and tests”, 2020.
- [59] International Electrotechnical Commission, “IEC 62660-1:2018. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles — Part 1: Performance testing”, 2018.
- [60] International Organization for Standardization, “ISO 12405-4:2018. Electrically-propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 4: Performance testing”, 2018.
- [61] SAE International, “SAE J1798:2019-11. Performance and Life Test Procedures for Electric Vehicle Battery Modules”, 2019.

RESUMEN

Este informe presenta un análisis del estado del arte de las baterías de ion sodio, abordando su desarrollo industrial, características tecnológicas y potencial como alternativa a las baterías de ion litio. Se examinan aspectos clave como la disponibilidad de materiales, el impacto medioambiental, la seguridad, así como el comportamiento electroquímico y térmico de estas tecnologías. Asimismo, se revisan los principales fabricantes y tendencias del mercado, junto con metodologías de caracterización aplicables a su evaluación en entornos industriales.

Los resultados muestran que las baterías de ion sodio representan una solución prometedora para aplicaciones estacionarias y de micromovilidad, gracias a su menor coste, mayor sostenibilidad y mejor comportamiento en condiciones extremas, aunque aún presentan limitaciones en densidad energética.

PALABRAS CLAVES

baterías de ion sodio, almacenamiento energético, transición energética, baterías Na-ion, caracterización electroquímica



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



© 2026 Cátedra Master Battery – Universidad Politécnica de Madrid. Todos los derechos reservados.

Este documento no podrá ser reproducido, distribuido ni modificado sin la autorización expresa del autor.

Contacto: catedra.masterbattery@ciudadenergia.com

Análisis de estado del arte de desarrollos industriales y caracterización de baterías de sodio © 2026 by Marcos Lafoz Pastor, Jorge Nájera Álvarez, Julio Amador Guerra y Alberto Abánades Velasco is licensed under CC BY-NC-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>